

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
14 août 2003 (14.08.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/066400 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : **B60T 8/00**

(72) Inventeur; et

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP03/01176

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : **BERTRAND, David** [FR/FR]; 9, boulevard Paul Cézanne, F-63400 Chamallières (FR).

(22) Date de dépôt international : 6 février 2003 (06.02.2003)

(74) Mandataire : **BAUVIR, Jacques**; M.F.P. Michelin, SGD/LG/PI-F35-Ladoux, F-63040 Clermont-Ferrand Cedex 09 (FR).

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :

02/01597 8 février 2002 (08.02.2002) FR

(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf CA, MX, US) : **SOCIÉTÉ DE TECHNOLOGIE MICHELIN** [FR/FR]; 23, rue Breschet, F-63000 Clermont-Ferrand (FR).

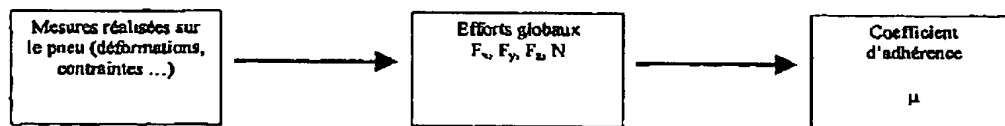
(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR),

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **MICHELIN RECHERCHE ET TECHNIQUE S.A.** [CH/CH]; Route Louis-Braille 10 et 12, CH-1763 Granges-Paccot (CH).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: ESTIMATING MAXIMUM FRICTION COEFFICIENT BASED ON KNOWLEDGE OF LOADS AND SELF-ALIGNMENT TORQUE GENERATED IN A TYRE CONTACT ZONE

(54) Titre : ESTIMATION DU COEFFICIENT D'ADHÉRENCE MAXIMAL À PARTIR DE LA CONNAISSANCE DES EFFORTS ET DU COUPLE D'AUTOALIGNEMENT GÉNÉRÉS DANS L'AIRE DE CONTACT D'UN PNEU



(57) Abstract: The invention concerns a method comprising the following steps: selecting several fixed points in space, located at different azimuths along the circumference in at least one sidewall of the tyre, performing as many measurements of circumferential distance variation (extension or contraction) at those fixed points when the tyre is running on the road surface, processing the measurement signals so as to extract therefrom the three components of a resultant of the loads exerted by the road surface on the contact zone of a tyre and the self-alignment torque generated by the tyre, processing the signals evaluating the three components of a resultant of the loads exerted by the road surface on the contact zone of a tyre and the self-alignment torque generated by the tyre so as to extract therefrom said friction coefficient μ .

(57) Abrégé : La méthode proposée comporte les étapes suivantes: sélectionner plusieurs points fixes dans l'espace, situés à des azimuts différents le long de la circonférence dans au moins un flanc du pneu, effectuer autant de mesures de variation de distance circonférentielle (extension ou contraction) à ces points fixes lorsque le pneu roule sur la chaussée, traiter les signaux de mesure de façon à en extraire les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu, traiter les signaux d'évaluation des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu de façon à en extraire ledit coefficient d'adhérence μ .

WO 03/066400 A1



brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

- 1 -

**Estimation du coefficient d'adhérence maximal à partir de la connaissance
des efforts et du couple d'autoalignement générés dans l'aire de contact
d'un pneu.**

5 La présente invention se rapporte à l'évaluation de l'adhérence d'un véhicule sur une chaussée. Elle concerne plus particulièrement la détermination des caractéristiques d'effort et de l'adhérence dans le contact entre la chaussée et une roue de véhicule, équipée d'un bandage élastique tel qu'un pneu gonflé ou un bandage élastique non pneumatique qui roule sur la chaussée.

10

La présente invention concerne aussi les divers dispositifs d'assistance électronique utilisés par exemple pour la régulation antiblocage des freins d'un véhicule ou la régulation anti-patinage des roues motrices, le contrôle de trajectoire d'un véhicule ou encore pour d'autres formes de contrôle ou de surveillance comme la pression des
15 pneus. On sait que de tels dispositifs reconstruisent par calcul le coefficient d'adhérence (μ) des pneus sur la chaussée, sans avoir procédé à la moindre mesure ni du coefficient d'adhérence ni des efforts développés dans le contact des pneus au sol. Même si ces dispositifs apportent une assistance remarquable et un surcroît de sécurité, leur fonctionnement gagnerait beaucoup à utiliser une valeur mesurée, ou estimée à partir de
20 mesures réelles effectuées sur le pneu en fonctionnement.

C'est pourquoi l'objectif de la présente invention est de proposer une évaluation des efforts en jeu dans le contact du véhicule sur la chaussée, et une évaluation de l'adhérence d'un véhicule sur une chaussée. Elle concerne plus particulièrement la
25 détermination de caractéristiques d'efforts et de l'adhérence entre la chaussée et une roue de véhicule, ou un pneu ou un bandage élastique, termes considérés comme équivalents dans le contexte de la présente invention.

Les divers dispositifs d'assistance électronique évoqués ci-dessus profiteraient donc
30 utilement d'indications « en temps réel » sur les efforts et les conditions d'adhérence susceptibles d'affecter le comportement d'un véhicule, notamment dans le cas où il subit une accélération par effort moteur ou par effort freineur ou par changement de

- 2 -

direction de déplacement. L'invention vise à fournir une méthode d'y parvenir de manière efficace.

Dans ce qui suit, on entend par « potentiel d'adhérence maximum » le rapport entre
5 l'effort tangentiel maximal (transversal, longitudinal ou les deux combinés) et l'effort normal que la roue peut subir sans glisser. Dans le texte, on le désigne aussi par le terme « coefficient d'adhérence maximal » ou la lettre μ .

On entend par « efforts globaux » les trois composantes de forces F_x , F_y et F_z
10 appliquées au centre de la roue et le couple d'auto-alignement N autour de l'axe Z .

Dans le but d'estimer le potentiel d'adhérence maximum, il a été proposé d'équiper la bande de roulement d'un pneu, ou certains éléments de la bande de roulement spécialement adaptés, de capteurs destinés à mesurer ou à estimer les efforts générés
15 localement, en particulier en conditions de glissement. Ces approches, quoique fort prometteuses, requièrent de faire fonctionner un capteur dans la bande de roulement du pneu, en particulier de le faire fonctionner de préférence pendant toute la vie du pneu. De plus, les estimations fournies par ces capteurs sont locales et donc très sensibles à l'état de surface de la chaussée.

20

Or comme on cherche en fait à estimer le potentiel d'adhérence maximum de la roue, il faut encore le déterminer à partir du potentiel local mesuré.

L'invention détaillée ici se distingue de ces approches locales. Elle peut être utilisée en
25 complément de celles-ci ou à la place de celles-ci. Elle propose d'utiliser une mesure des déformations globales du pneu de manière à obtenir une information sur le potentiel d'adhérence maximum de la roue sur le sol. En effet, lorsque le pneu est soumis à une sollicitation, le point d'application des forces appliquées dans l'aire de contact dépend entre autre du coefficient d'adhérence maxi parce que, dès qu'une partie de l'aire de
30 contact de la roue sur la chaussée est en glissement, sa contribution aux efforts tangentiels est saturée à un niveau qui dépend du coefficient d'adhérence. Les déformations du pneu sont elles mêmes sensibles au déplacement de ce point

- 3 -

d'application. En particulier, l'extension circonférentielle des flancs, sensible aux efforts appliqués, est aussi sensible au déplacement du point d'application des forces dans l'aire de contact.

- 5 La méthode proposée utilise des mesures des déformations circonférentielles du flanc en certains azimuts du pneu pour permettre une estimation des efforts et du coefficient d'adhérence maxi.

L'invention propose une méthode de détermination du coefficient d'adhérence μ dans
10 l'aire de contact d'un pneu sur une chaussée, comportant les étapes suivantes :

- déterminer les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu,
- traiter les signaux d'évaluation des trois composantes d'une résultante d'efforts
15 exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu de façon à en extraire ledit coefficient d'adhérence μ .

La description faite ci-dessous propose en outre une détermination des trois
20 composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu comportant les étapes suivantes :

- sélectionner plusieurs points fixes dans l'espace, situés à des azimuts différents le long de la circonférence dans au moins un flanc du pneu,
- 25 • effectuer autant de mesures de variation de distance circonférentielle (extension ou contraction) à ces points fixes lorsque le pneu roule sur la chaussée
- traiter les signaux de mesure de façon à en extraire les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu,
- 30 • traiter les signaux d'évaluation des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple

- 4 -

d'auto-alignement généré par le pneu de façon à en extraire ledit coefficient d'adhérence μ .

Cependant, cette détermination n'est pas impérative et l'on pourrait appliquer
5 l'estimation coefficient d'adhérence μ proposée ci-dessous à partir de valeurs des trois
composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un
pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu obtenus autrement.

Pour fournir une bonne estimation de μ , la méthode nécessite qu'il existe une zone de
10 glissement dans l'aire de contact, qu'elle soit créée par une conception spéciale du pneu
ou par un niveau suffisant de sollicitation appliqué au pneu. De manière à obtenir une
information fiable même en cas de faible glissement, il est proposé d'estimer, en plus du
potentiel d'adhérence maximal, le pourcentage de potentiel utilisé. Cette grandeur
présente en effet l'avantage d'être plus facilement estimée en valeur absolue même pour
15 des sollicitations faibles.

La méthode de l'invention est basée sur la constatation du fait que les efforts agissant
entre la bande de roulement du pneu et la chaussée provoquent une déformation sensible
et reproductible sous forme d'une extension ou contraction circonférentielle des flancs
20 des pneus. Cette déformation d'extension ou de contraction circonférentielle, si l'on
parvient à la mesurer isolément lors de la rotation du pneu en temps réel, peut permettre
de connaître à chaque instant le sens et l'intensité des efforts agissant sur le pneu ainsi
que le signe et l'intensité du couple d'auto-alignement exercé par le pneu et le
coefficient d'adhérence du pneu sur la chaussée.

25 Du fait même de sa conception et de son mode de fonctionnement, les déformations
générées dans le pneu lorsqu'il est sollicité dépendent aussi de sa pression de gonflage.
Ainsi, la pression de gonflage est avantageusement un des paramètres utilisés et/ou
traités dans la méthode proposée ici. Cette pression peut être connue par un moyen de
30 mesure spécifique et indépendant des mesures faites dans le contexte de cette invention,
un exemple d'un tel moyen étant un capteur de pression. Cette pression peut aussi
découler d'un traitement spécifique de la mesure des déformations circonférentielles.

Dans des conditions réelles d'utilisation, le pneu est fréquemment soumis à des variations de l'angle de carrossage. Il en résulte une modification des déformations du pneu. Ainsi, le carrossage est avantageusement un des paramètres de la méthode proposée ici. Le carrossage peut être connu par un moyen de mesure spécifique et indépendant des mesures faites dans le contexte de cette invention, un exemple d'un tel moyen étant un capteur d'angle de carrossage. Ce carrossage peut aussi découler d'un traitement spécifique de la mesure des déformations circonférentielles.

10 Sous un aspect particulier mais intéressant, l'invention propose d'estimer la contraction ou l'extension circonférentielle des flancs par la mesure de la distance entre les fils de la nappe carcasse dans les flancs. On peut aussi mesurer la distance entre des (par exemple deux) fils placés dans les flancs pour former un capteur, et qui subissent des mouvements corrélés à ceux des fils de la nappe carcasse. On parlera dans la suite de la mesure de « l'écart entre les fils ». Notons que si cette dénomination est liée à la structure radiale d'un pneu la méthode ne s'applique pas uniquement aux pneus à carcasse radiale. Ainsi, on parlera « d'écart fils » pour désigner la distance moyenne entre deux tracés réalisés sur le flanc à des azimuts voisins mais différents.

20 Notons que dans le cas où la mesure de l'extension circonférentielle des flancs est réalisée dans l'épaisseur des flancs à un endroit différent de leur fibre neutre en flexion, l'extension circonférentielle inclut une composante due à la flexion du flanc, notamment lors du passage dans l'aire de contact (phénomène aussi appelé « ventre de lapin »). Cette composante due à la flexion n'est en aucun cas un problème et peut être mise à profit pour augmenter la dynamique de variation des signaux utilisés par l'invention en réalisant la mesure d'extension ailleurs que sur la fibre neutre en flexion.

La suite de la description explique plus en détails l'invention à l'aide des figures jointes dans lesquelles :

30 la figure 1 est une perspective d'un pneu sur lequel on définit des conventions utiles à l'intelligence de l'invention ;

- la figure 2 est une vue de face d'un pneu schématique permettant d'expliquer l'invention ;
- la figure 3 est une vue de côté d'un pneu schématique permettant d'expliquer l'invention ;
- 5 la figure 4 illustre le cisaillement d'une nervure dans l'aire de contact, ainsi que les contraintes associées ;
- la figure 5 illustre l'effet du coefficient de frottement sur la répartition des efforts ;
- la figure 6 illustre la relation entre N et F_y sur un pneu réel en fonction du coefficient de frottement ;
- 10 la figure 7 représente la relation entre N et F_y à F_x nul et F_z constant lorsque l'angle de carrossage varie ;
- la figure 8 représente la relation entre N et F_y à F_x nul et F_z constant lorsque la pression de carrossage varie ;
- la figure 9 donne le domaine d'utilisation de la méthode ;
- 15 les figures 10a et 10b montrent l'effet de la composante verticale F_z :
- où la courbe pleine correspond à une charge verticale de 400 daN,
 - où la courbe en pointillés correspond à une charge verticale de 500 daN,
 - où la courbe en trait mixte correspond à une charge verticale de 300 daN ;
- les figures 11a et 11b montrent l'effet de la composante F_x :
- 20 - où la courbe pleine correspond à une charge verticale de 400 daN et une absence de force F_x ,
- où la courbe en pointillés correspond à une charge verticale de 400 daN et une force F_x de 400 daN (force motrice),
 - où la courbe en trait mixte correspond à une charge verticale de 400 daN et une
- 25 force F_x de - 400 daN (force freineuse) ;
- les figures 12a et 12b montrent l'effet de la composante F_y :
- où la courbe pleine correspond à une charge verticale de 400 daN sans effort F_y ,
 - où la courbe en pointillés correspond à une charge verticale de 400 daN avec un effort F_y de 280 daN ;
- 30 la figure 13 montre la déformation du pneumatique lorsqu'un angle de carrossage est appliqué,

les figures 14a et 14b montrent l'effet du carrossage sur les signaux de déformation circonférentielle :

- où la courbe pleine correspond à une charge verticale de 400 daN sans effort F_x et F_y et à un angle de carrossage nul,
- 5 - où la courbe en pointillés correspond à une charge verticale de 400 daN avec un angle de carrossage de 2° ,
- où la courbe en traits mixtes correspond à une charge verticale de 400 daN avec un angle de carrossage de 4° ;

la figure 15 montre l'architecture de réseau de neurones ;

- 10 la figure 16 montre des exemples de fonction de transfert où les combinaisons linéaires en entrée sont facultatives. Il est possible d'utiliser un réseau à plusieurs sorties ou plusieurs réseaux à une sortie ou toute autre combinaison ;

les figures 17a et 17b montrent deux exemples d'architecture permettant de prendre en compte la pression de gonflage du pneumatique si celle-ci varie ;

- 15 la figure 18 montre le signal temporel brut et filtré ;

la figure 19 montre l'identification du passage dans l'aire de contact à partir du signal temporel ;

la figure 20 montre un exemple de fonctionnement avec un capteur et un modèle ;

la figure 21 montre un exemple de fonctionnement avec trois capteurs et un modèle ;

- 20 la figure 22 montre un exemple de fonctionnement avec trois capteurs et deux modèles :
- où les positions indiquées en traits pleins représentent les azimuts auxquels les mesures doivent être prises pour servir d'entrée au modèle 1,
 - où les positions indiquées en traits pointillés représentent les azimuts auxquels les mesures doivent être prises pour servir d'entrée au modèle 2,
- 25 - où C1, C2 et C3 représentent les positions des capteurs sur le flanc d'un pneumatique.

la figure 23 est un bloc diagramme de l'estimation des efforts, puis de μ à partir des mesures de déformation ;

- la figure 24 donne les résultats de l'estimation de μ et du pourcentage du potentiel d'adhérence utilisé « pu ».
- 30

La méthode décrite ici s'appuie sur le fait que chaque force appliquée au pneu dans l'aire de contact provoque une modification de l'extension circonférentielle des flancs du pneu. Considérons le cas d'un pneu monté sur sa roue et gonflé sur le premier flanc duquel on repère (figure 1) deux points A_1 et A_2 placés sur un même rayon mais séparés dans la direction circonférentielle. Sur le second flanc, aux mêmes azimuts que A_1 et A_2 et sur le même rayon, on choisit deux points B_1 et B_2 . En l'absence de forces appliquées sur le pneu, la distance qui sépare les deux points est constante en fonction de l'angle de rotation de l'ensemble monté. Définissons l'azimut θ comme l'angle auquel on analyse l'extension circonférentielle des flancs. L'origine de l'azimut est prise à l'opposé du centre de l'aire de contact. Le centre de l'aire de contact a donc l'azimut 180° .

Lorsque le pneu est soumis à des forces, on observe les effets suivants pour chacune des composantes desdites forces :

- La composante verticale (dénommée F_z) plaque le pneu sur le sol. En créant une aire de contact, elle entraîne une variation de la distance entre les deux points A_1 et A_2 lorsque le pneu est en rotation, traduisant une modification de l'extension circonférentielle des flancs. Les figures 10a et 10b indiquent la distance qui sépare, respectivement les points A et les points B, en fonction de l'azimut auquel ils se trouvent. L'augmentation de la composante verticale appliquée entraîne une extension des deux flancs dans l'aire de contact (augmentation de la distance vers 180°) et une contraction des autres zones du flanc, principalement en entrée et en sortie de l'aire de contact (diminution de la distance partout ailleurs, principalement vers 135° et 225°). Il est aussi intéressant de constater qu'il existe un azimut en entrée de l'aire de contact et un azimut en sortie d'aire de contact où la valeur d'extension circonférentielle est sensiblement indépendante de la composante F_z appliquée. Soit α_0 tel que ces azimuts particuliers soient égaux à $(180-\alpha_0)^\circ$ et $(180+\alpha_0)^\circ$.
- La composante horizontale dans la direction de roulage (dénommée F_x) provoque une différenciation des zones situées en entrée et en sortie de l'aire de contact. Ceci se traduit par une évolution de l'extension des flancs essentiellement en entrée et en sortie de l'aire de contact. Les figures 11a et 11b illustrent les effets de la composante F_x des forces appliquées, en indiquant la distance qui sépare,

respectivement les points A et les points B, en fonction de l'azimut auquel ils se trouvent. Lorsqu'une force F_x positive est appliquée (couple moteur), les deux flancs sont comprimés dans la direction circonférentielle en entrée d'aire de contact et en extension en sortie d'aire de contact (Diminution de la distance environ vers 135° et augmentation environ vers 225°). Lorsqu'une force F_x négative est appliquée (couple freineur), les deux flancs sont comprimés dans la direction circonférentielle en sortie d'aire de contact et en extension en entrée (Diminution de la distance vers 225° et augmentation vers 135°).

- La composante horizontale dans la direction transverse (dénommée F_y) provoque principalement une différenciation des deux flancs. Les figures 12a et 12b illustrent les effets de ce type de sollicitation, en indiquant la distance qui sépare, respectivement les points A et les points B, en fonction de l'azimut auquel ils se trouvent. Dans le cas d'une sollicitation avec F_y positif, l'un des flancs est principalement mis en extension circonférentielle (augmentation de la distance entre A_1 et A_2) et l'autre flanc est mis en contraction circonférentielle (diminution de la distance entre B_1 et B_2).

Le couple d'auto-alignement N (moment autour de l'axe vertical) n'est pas à proprement parler un autre effort agissant entre la bande de roulement du pneu et la chaussée. Il s'agit plutôt d'une conséquence de la façon dont les composantes F_x , F_y et F_z sont appliquées dans l'aire de contact. Si le point d'application de la résultante ayant pour composantes F_x , F_y et F_z n'est pas le centre de l'aire de contact, cette résultante génère un moment autour de O_z que l'on appelle couple d'auto-alignement. La présence de ce moment se traduit principalement par une rotation de l'aire de contact autour de O_z . Cet effet a pour conséquence par exemple une extension circonférentielle en entrée d'aire de contact et une contraction circonférentielle en sortie d'aire de contact sur un flanc alors que sur l'autre flanc on observe une contraction circonférentielle en entrée d'aire de contact et une extension circonférentielle en sortie d'aire de contact par rapport à une situation à couple d'auto-alignement nul.

30

Dans le cas où un angle de carrossage significatif est appliqué au pneumatique, les comportements des deux flancs se distinguent. De manière simplifiée, tout se passe

comme si un flanc porte plus de charge que l'autre. La figure 13 illustre ce fonctionnement en comparant une section de la partie du pneu dans l'aire de contact sans carrossage et avec un carrossage γ . Il en résulte aussi un léger déplacement latéral de l'aire de contact qui se traduit par une poussée dans la direction Y. Les figures 14a et 14b montrent l'évolution de la déformation circonférentielle dans les deux flancs. Sur le flanc surchargé (Points A), l'évolution est semblable à celle d'une augmentation de la charge. Sur l'autre flanc (Points B), on constate une évolution compatible avec une diminution de la charge portée.

- 10 Avant de poursuivre, notons que le signal d'extension en fonction de l'azimut $s(\theta)$ peut se décomposer en deux signaux $s_p(\theta)$ et $s_i(\theta)$ tels que :

$$s(\theta) = s_p(\theta) + s_i(\theta)$$

$$s_i(\theta) = -s_i(-\theta)$$

$$s_p(\theta) = s_p(-\theta),$$

- 15 où s_i est appelé partie impaire et s_p partie paire du signal s .

De même, soient $s^1(\theta)$ et $s^2(\theta)$ les signaux associés à la mesure de l'extension circonférentielle sur chacun des flancs du pneu et $S_p^1, S_i^1, S_p^2, S_i^2$ leurs décompositions en partie paire et impaire en azimut. On définit :

$$20 \quad s_p^p(\theta) = \frac{s_p^1(\theta) + s_p^2(\theta)}{2}$$

$$s_p^i(\theta) = \frac{s_p^1(\theta) - s_p^2(\theta)}{2}$$

$$s_i^p(\theta) = \frac{s_i^1(\theta) + s_i^2(\theta)}{2}$$

$$s_i^i(\theta) = \frac{s_i^1(\theta) - s_i^2(\theta)}{2}$$

s_p^p est appelée partie paire en flanc et paire en azimut.

- 25 s_p^i est appelée partie impaire en flanc et paire en azimut.

s_i^p est appelée partie paire en flanc et impaire en azimut.

s_i^i est appelée partie impaire en flanc et impaire en azimut.

Les efforts F_x , F_y , F_z et le couple d'auto-alignement N sont de par leurs orientations liés à certaines symétries. En particulier, on peut utiliser ce principe pour découpler les effets des composantes efforts sur le pneu.

5

Fort de ces observations, la méthode explicitée ici propose de réaliser des mesures de l'extension circonférentielle sur au moins un flanc du pneumatique. Ces mesures permettent, grâce à des opérations mathématiques (combinaisons linéaires ou non entre les mesures réalisées aux différents azimuts), d'estimer les valeurs des signaux s_i^p , s_p^i , s_p^p et s_i^i en certains azimuts et par là même de fournir une évaluation du coefficient d'adhérence.

10

Revenons aux figures 14a et 14b. Vu que l'évolution est impaire en flancs et paire en azimuts, il est possible de distinguer simplement un effet du carrossage d'un effet F_x , F_z et N . Les figures 12 et 14 montrent que les conséquences de F_y et du carrossage ne sont pas identiques, on peut donc établir un lien sans ambiguïté entre les signaux de déformation circonférentielle et le carrossage. Il est alors possible d'estimer à l'aide des mesures de déformation circonférentielle l'angle de carrossage sous lequel le pneu travaille.

20

La rigidité apparente d'un pneumatique provient à la fois de son fonctionnement pneumatique (de sa pression de gonflage) et de sa rigidité structurelle (rigidité de son architecture). Les signaux de déformation circonférentielle mesurés contiennent eux aussi une composante pneumatique et une composante structurelle. Par exemple, les signaux de déformation d'un pneu gonflé à 2 bars et chargé à 400 daN suivant Z ne sont pas identiques à ceux délivrés par le même pneu à 2.5 bars et chargé à 500 daN. Cette différence correspond à la contribution structurelle et peut permettre d'estimer la pression de gonflage du pneumatique.

25

Dans le cas où la pression de gonflage varie, les liens qui relient les efforts appliqués et les signaux de déformation sont quantitativement modifiés, mais sans que leur nature ne soit changée. Les taux d'extension dans les flancs sont influencés par la pression et par

30

la charge ; ils sont composés d'une contribution due au fonctionnement « pneumatique » (c'est à dire dépendant de la pression de gonflage) et une autre contribution due au fonctionnement structurel (c'est à dire des matériaux constitutifs du pneu et de leur arrangement), lequel ne change pas quand on change la pression, d'où on peut remonter à la pression.

Ainsi, la méthode peut être expliquée d'abord dans le cas d'une pression de gonflage supposée constante dans un but de simplicité. De même, nous considérons dans la suite que le carrossage est constant et nul pour rendre l'explication plus claire et ne mentionnons que les cas les plus intéressants vis à vis de ce paramètre.

Lorsque qu'une sollicitation qui mêle des composantes F_x , F_y et F_z est appliquée, on observe une superposition des effets énoncés précédemment sur l'extension dans la direction circonférentielle. Un des avantages de la méthode proposée est de permettre une séparation des contributions de chaque composante de la sollicitation appliquée, de manière à permettre une estimation de chacune de ces composantes.

L'estimation de l'adhérence proposée par l'invention repose sur la remarque suivante : considérons un pneu simplifié muni d'une nervure unique continue. Les figures 2 et 3 représentent un tel pneu. Dans la zone de l'aire de contact, la nervure est soumise à une contrainte verticale qui la plaque contre le sol. On parle souvent de mise à plat, dans l'empreinte du pneu sur le sol. En l'absence de dérive du pneu, une droite formée par des points de repère pris sur la nervure de façon à ce qu'ils soient alignés dans l'empreinte de contact avec le sol sont ensuite, lors de la rotation du pneu, compris dans un plan qui contient ladite droite définie lorsque les points étaient dans l'empreinte de contact. Si l'on applique un angle de dérive au pneu en roulage, le plan contenant lesdits points de repère lorsqu'ils sont suffisamment éloignés de l'empreinte de contact au sol forme un angle égal à l'angle de dérive avec les points de repère lorsqu'ils sont alignés dans l'empreinte de contact avec le sol. Sur la figure 4, on peut observer en trait plein la nervure vu de dessus sans dérive et en pointillés la nervure avec une dérive imposée. Plus on s'enfonce dans l'aire de contact, plus la nervure est cisailée et plus la contrainte latérale qui s'applique est grande. Si l'angle de dérive est suffisant, il existe dans l'aire

de contact un point G_1 où cette contrainte latérale devient supérieure au potentiel d'adhérence maximum μ_1 , la nervure se met à glisser. Cette situation est représentée en trait mixte sur la figure 4.

- 5 La force latérale F_{y1} générée par le pneu est égale à l'intégrale dans l'aire de contact de la contrainte latérale.

Si le pneu est placé à un endroit où le potentiel d'adhérence maxi μ_2 est plus faible que μ_1 , il est nécessaire d'augmenter l'angle de dérive pour que le pneu génère la même
10 force de poussée F_y . La zone de glissement commence désormais au point G_2 plus proche de l'entrée de l'aire de contact. La figure 5 permet de comparer les deux situations.

Entre ces deux configurations, les efforts latéraux sont les mêmes (même aire sous la
15 courbe) mais le point d'application de la force F_y s'est déplacé. Plus le potentiel d'adhérence maxi diminue, c'est à dire plus le coefficient d'adhérence diminue, plus le point d'application de la force latérale se déplace vers l'entrée de l'aire de contact.

Une conséquence est que pour le même effort latéral F_y , les couples d'auto-alignement
20 diffèrent en raison d'un déplacement du point d'application de la force. En théorie, on peut utiliser la mesure des efforts globaux (ici F_y et N) pour estimer le coefficient d'adhérence maxi. En effet, pour un effort F_y donné, il existe une relation monotone entre le couple d'auto-alignement N et le potentiel maxi d'adhérence μ . Ainsi, dans cet exemple, la mesure simultanée de F_y et N permet de mesurer le potentiel d'adhérence
25 maxi μ si une zone de glissement existe dans l'aire de contact.

Puisque la mesure de l'extension circonférentielle nous permet d'estimer les efforts globaux (F_x , F_y , F_z , N), elle nous permet par un traitement supplémentaire et en utilisant le principe développé précédemment d'estimer le niveau d'adhérence
30 maximum.

Sur un pneu réel, le fonctionnement est plus complexe et d'autres phénomènes se superposent à ceux retenus dans cet exemple, mais le même principe s'applique pour mesurer le potentiel d'adhérence maxi.

- 5 On considère cette fois non seulement F_y mais aussi F_x et F_z , qui peuvent varier et influencer au même titre que μ sur la géométrie de la zone en glissement et donc sur N . Il existe donc une fonction f telle que :

$$N = f(F_x, F_y, F_z, \mu, \dots)$$

- 10 La figure 6 représente la fonction f en fonction de F_y pour plusieurs niveaux de μ , F_x constant (0 daN) et F_z constant (400 daN). On peut observer les trois zones de fonctionnement (Absence de glissement : zone 1, glissement partiel : zone 2, glissement total : zone 3).

- 15 En fonctionnement courant, d'autres paramètres du pneu évoluent constamment et modifient la relation qui existe entre les efforts. En particulier, l'angle de carrossage appliqué au pneu et la pression de gonflage sont susceptibles de varier. Il est alors nécessaire de considérer $N = f(F_x, F_y, F_z, \mu, P, \gamma)$

- 20 Pour un pneumatique donné, roulant dans des conditions d'adhérence fixées, la variation de l'angle de carrossage a pour effet de modifier la relation $N = f(F_x, F_y, F_z, \mu)$ en se traduisant essentiellement par une translation de la surface dans l'espace (F_x, F_y, F_z) . La figure 7 représente la relation entre N et F_y à F_x nul et F_z constant pour différentes valeurs d'angle de carrossage. Si nous connaissons l'angle de carrossage (par une mesure ou une estimation), il nous est possible de prendre en compte cette perturbation en appliquant une translation pour se ramener au cas du carrossage nul avant d'appliquer la fonction g qui donne n'estimation de μ .

- La pression de gonflage du pneumatique a bien entendu aussi une influence directe sur la relation $N = f(F_x, F_y, F_z, \mu)$. La figure 8 présente pour la condition $F_x=0$, $F_z=cste$ l'effet de la variation de pression sur $N = f(F_x, F_y, F_z, \mu)$. L'effet principal observé se traduit par une rotation de centre O ($F_y=0, N=0$). Toutefois, une correction simple a

priori comme celle proposée pour le carrossage (dans ce cas, ce serait une rotation) n'apparaît pas assez précise. Une parade consiste à rechercher une fonction inverse

$\mu = \tilde{g}(F_x, F_y, F_z, N, P)$ prenant en compte explicitement la pression comme paramètre.

- 5 L'usure du pneumatique est elle aussi un facteur influent sur la relation qui existe entre les efforts et le niveau d'adhérence. La perturbation engendrée est difficile à modéliser mais reste assez petite. Une approche consiste alors à utiliser une fonction inverse g moyenne établie à partir des caractéristiques d'un pneu neuf et d'un pneu usé.

Dans les cas correspondant aux zones 2 et 3 de la figure 6, il existe une fonction g telle

10 que :

$$\mu = g(F_x, F_y, F_z, N, P, \gamma, \dots)$$

On peut par exemple la déterminer en utilisant une approche par réseau de neurones.

Toutefois, toute autre méthode mathématique permettant d'inverser une fonction ou
15 d'approcher son inverse est utilisable.

L'application d'une approche par réseaux de neurones à l'évaluation ci-dessus montre qu'il existe un domaine I d'efforts F_x, F_y, F_z dans lequel une telle fonction g existe. Ce domaine se caractérise physiquement de la façon suivante :

- 20 – Il existe une zone de glissement dans l'aire de contact, ce qui permet à μ d'avoir un effet sur N .
– Pour tout point de ce domaine, N varie de façon monotone avec μ à efforts F_x, F_y et F_z fixés.

- 25 La figure 9 représente une estimation du domaine I dans lequel il est possible d'obtenir une estimation directe du potentiel d'adhérence maxi. Ce domaine est constitué de la réunion des zones marquée A, B et C en excluant la zone où il n'y a pas de glissement partiel (zone elliptique autour de $F_x=0$ et $F_y=0$).

- La partie appelée A correspond à des situations où l'effort latéral est très important.
30 Cette zone correspond par exemple à des virages très serrés.
– La partie appelée B est la plus fréquentée en utilisation normale du véhicule. Ce sont des situations de freinage et d'accélération légers combinés ou non avec un virage.

- Enfin, la zone C correspond à un freinage très appuyé.

Dans ce domaine I, il est possible de définir un réseau de neurones, de type perceptron, approchant la fonction inverse g. Concrètement, la détermination des poids du réseau de neurones peut se faire de la façon suivante :

- Constitution d'une base de données contenant F_x , F_y , F_z et N pour un ensemble de sollicitations du pneu sur des sols présentant des coefficients d'adhérence différents. Des combinaisons des paramètres (F_x , F_y , F_z et μ) sont imposées au pneu. Elles sont enregistrées en même temps que la valeur du couple d'auto-alignement N mesurée. Cette opération peut être réalisée soit sur une machine munie de différents sols et d'une mesure des efforts et de N , soit sur un véhicule équipé d'une roue dynamométrique qui mesure F_x , F_y , F_z et N en roulant sur différents sols. Dans le cas où il est nécessaire que le système fonctionne avec des conditions de carrossage et de pression variables, la base de données doit aussi contenir suffisamment de cas de sollicitation représentatifs du domaine à couvrir.
- Détermination par apprentissage des poids d'un réseau de neurones permettant de reconstruire μ à partir de la connaissance de F_x , F_y , F_z et N et éventuellement de la pression de gonflage P et du carrossage γ . Dans le cas où la correction par translation des courbes est suffisante pour prendre en compte l'effet du carrossage, la démarche consistera à déterminer la translation à appliquer en fonction de l'angle de carrossage de manière à ramener toutes les conditions au cas du carrossage nul. Ensuite, il sera possible de déterminer par apprentissage les poids d'un réseau de neurones.
- Test et utilisation de la fonction de transfert ainsi déterminée sur l'ensemble du domaine couvert par l'apprentissage.

Notons ici qu'une façon intéressante de réduire le nombre de paramètres d'entrée au prix d'une baisse de précision consiste à utiliser non pas les efforts F_x , F_y et F_z et N

mais les valeurs réduites $\frac{F_x}{F_z}$, $\frac{F_y}{F_z}$, $\frac{N}{F_z}$. En procédant d'une manière semblable à celle

détaillée précédemment, on obtient alors une fonction h telle que $\mu = h\left(\frac{F_x}{F_z}, \frac{F_y}{F_z}, \frac{N}{F_z}, \dots\right)$

En pratique, la détermination des coefficients du modèle se fait de manière préférée
5 suivant une démarche précise afin d'obtenir un modèle de bonne qualité à partir d'un nombre de mesures le plus réduit possible. Cette démarche peut se décomposer en plusieurs étapes successives :

- ♦ Ajout de données pour bien couvrir l'espace. Suivant le moyen de test utilisé pour solliciter le pneu, il peut être difficile de bien balayer l'espace des valeurs de F_x , F_y
10 et F_z . Dans cette première étape, on utilise un modèle de N ajusté sur les données expérimentales et dont la forme mathématique permet de représenter les variations physiques de N en fonction des efforts pour ajouter des points supplémentaires dans les zones où les mesures sont peu nombreuses.
- ♦ Sélection des données pertinentes. Dans l'espace F_x , F_y , F_z , les points de mesure
15 obtenus ne sont pas toujours bien répartis. Certaines régions de l'espace contiennent beaucoup de mesures alors que dans d'autres, les points de mesure sont moins nombreux. L'utilisation directe de ces données conduirait à donner plus de poids aux régions bien peuplées par rapport aux autres régions lors de la recherche des coefficients du modèle inverse. Une manière de procéder consiste à découper
20 l'espace en cellules de taille constante et à ne garder qu'un nombre maximum de points par cellule. Plutôt que de conserver des points de mesure au hasard, il est d'ailleurs possible d'éliminer les mesures les plus dispersées.
- ♦ Recherche d'un modèle direct $N = f(F_x, F_y, F_z, \mu, \dots)$ et ajout de données pour des
25 niveaux d'adhérence intermédiaires. En effet, expérimentalement il est difficile de disposer de conditions d'adhérence différentes et bien maîtrisées. Pour rechercher le modèle donnant μ , on est bien souvent contraint à utiliser uniquement deux ou trois niveaux distincts d'adhérence, ce qui est parfois insuffisant. On peut contourner cette difficulté en recherchant un modèle direct paramétré par μ à l'aide des niveaux d'adhérence disponibles et en l'utilisant pour ajouter des points à des adhérences

intermédiaires. Il est aussi possible de construire un modèle direct par valeur de μ mesurée et d'interpoler entre ces niveaux.

- ◆ Recherche du modèle inverse $\mu = g(F_x, F_y, F_z, N, \dots)$ à partir de la concaténation des données mesurées et ajoutées. Dans cette phase, on ajuste le modèle final qui peut être sous la forme d'un réseau de neurones à l'aide des données expérimentales triées et de données ajoutées qui permettent de contraindre la forme du modèle dans certaines régions.

Obtenir une estimation du coefficient d'adhérence maxi à partir des fonctions précédemment définies suppose impérativement de connaître F_x , F_y , F_z et N ainsi que la pression et le carrossage dans l'hypothèse où on les prend en compte. On peut par exemple et de manière préférée les déterminer de la façon suivante à partir de mesures d'extension circonférentielle, en s'appuyant en partie sur des caractéristiques de parité remarquables qui correspondent aux symétries naturelles du pneu pour réaliser cette séparation.

On a défini l'azimut θ comme l'angle auquel on analyse l'extension circonférentielle des flancs. L'origine de l'azimut a été fixée à l'opposé du centre de l'aire de contact. Le centre de l'aire de contact a donc l'azimut 180° . On a vu que signal d'extension en fonction de l'azimut $s(\theta)$ peut se décomposer en deux signaux $s_p(\theta)$ et $s_i(\theta)$ tels que :

$$s(\theta) = s_p(\theta) + s_i(\theta)$$

$$s_i(\theta) = -s_i(-\theta)$$

$$s_p(\theta) = s_p(-\theta)$$

s_i est appelé partie impaire et s_p partie paire de s en azimut.

De même, on a défini :

$$s_p^p(\theta) = \frac{s_p^1(\theta) + s_p^2(\theta)}{2}$$

$$s_p^i(\theta) = \frac{s_p^1(\theta) - s_p^2(\theta)}{2}$$

$$s_i^p(\theta) = \frac{s_i^1(\theta) + s_i^2(\theta)}{2}$$

$$s_i^i(\theta) = \frac{s_i^1(\theta) - s_i^2(\theta)}{2}$$

s_p^p est appelée partie paire en flanc et paire en azimut.

s_p^i est appelée partie impaire en flanc et paire en azimut.

5 s_i^p est appelée partie paire en flanc et impaire en azimut.

s_i^i est appelée partie impaire en flanc et impaire en azimut.

Ainsi, d'après les observations (figures 8a, 8b, 9a, 9b, 10a et 10b) le signal :

- s_i^p est majoritairement lié à la force F_x .
- 10 • s_p^i est majoritairement lié à la force F_y
- s_p^p est majoritairement lié à la force F_z

Les symétries qui s'appliquent permettent de plus d'affirmer que le signal s_i^i est principalement lié au couple d'auto-alignement N.

15

Fort de ces observations, la méthode explicitée ici propose de réaliser des mesures de l'extension circonférentielle sur au moins un flanc du pneumatique. Ces mesures permettent grâce à des opérations mathématiques (combinaisons linéaires ou non entre les mesures réalisées aux différents azimuts) d'estimer les valeurs des signaux s_i^p s_p^i s_p^p et s_i^i en certains azimuts et par là même de fournir une évaluation des composantes de la force appliquée.

20

Dans le but d'éclairer la démarche, on présente ici quelques exemples d'utilisation de la méthode qui ne sont pas exhaustifs. Considérons le cas où les mesures sont réalisées sur un flanc uniquement.

25

Détermination 1 :

On souhaite estimer les composantes des efforts appliqués dans l'aire de contact et le couple d'auto-alignement à partir de mesures de l'extension circonférentielle d'un flanc

30

du pneumatique mesurée en trois azimuts. Les azimuts de mesure sont choisis de la manière suivante :

- Un des azimuts correspond au milieu de l'aire de contact (azimut 180°). Soit V_c la valeur mesurée à ce point. L'azimut qui correspond à l'opposé de l'aire de contact est utilisable de manière équivalente.
- Les deux autres azimuts sont symétriques par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact. ($180^\circ + \alpha^\circ$ et $180^\circ - \alpha^\circ$). Soient V_1 et V_2 les valeurs mesurées en ces points.

D'après les observations précédentes :

- $V_2 - V_1$ permet d'estimer le déséquilibre entre l'entrée d'aire de contact et la sortie. Cette valeur sera principalement liée à la composante F_x . Une estimation de F_x est donnée par $f_x(V_2 - rV_1)$ où r est un coefficient réel positif et f_x une fonction continue. Le coefficient r permet de prendre en compte une éventuelle dissymétrie de fonctionnement du capteur. Il est déterminé par exemple de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre F_x et $(V_2 - rV_1)$.
- $V_c - (V_1 + V_2)$ permet d'estimer la différence entre le passage dans l'aire de contact et l'extérieur de l'aire de contact. Le résultat est ici principalement lié à F_z . Une estimation de F_z est donnée par $f_z(V_c - (s_1V_1 + s_2V_2))$ où s_1, s_2 sont des coefficients réels positifs et f_z une fonction continue. Les coefficients s_1 et s_2 sont déterminés par exemple de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre F_z et $V_c - (s_1V_1 + s_2V_2)$.
- $V_c + V_1 + V_2$ donne une indication sur l'extension globale du flanc. Cette valeur sera principalement liée à la composante F_y de la force appliquée. Une estimation de F_y est donnée par $f_y(V_c + u_1V_1 + u_2V_2)$ où u_1 et u_2 sont des coefficients réels positifs et f_y une fonction continue. Les coefficients u_1 et u_2 sont déterminés par exemple de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre F_y et $V_c + u_1V_1 + u_2V_2$.

Dans cette détermination, on estime trois composantes (F_x , F_y , F_z) à partir de trois mesures d'extension circonférentielle. Cette première configuration simple peut ne pas s'avérer suffisante pour permettre une estimation de l'adhérence maximale.

5 Détermination 2 :

On souhaite estimer les composantes des efforts appliqués dans l'aire de contact et le couple d'auto-alignement à partir de mesures de l'extension circonférentielle d'un flanc du pneumatique mesurée en cinq azimuts. Dans ce cas particulier, la détermination des
10 trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu est déduite d'au moins cinq mesures de variation de distance circonférentielle (extension ou contraction) effectuées dans au moins un flanc du pneu, en cinq points fixes dans l'espace, situés à des azimuts différents le long de la circonférence, puis ledit coefficient d'adhérence μ
15 est déduit de la détermination des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu. Les azimuts de mesure sont choisis de la manière suivante :

- Un des azimuts correspond au milieu de l'aire de contact (azimut 180°). Soit V_c la valeur mesurée à ce point.
- 20 • Deux autres azimuts sont symétriques par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact. ($180^\circ + \alpha^\circ$ et $180^\circ - \alpha^\circ$). Soient V_1 et V_2 les valeurs mesurées en ces points.
- Les deux derniers azimuts sont symétriques par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact. ($180^\circ + \beta^\circ$ et $180^\circ - \beta^\circ$). Soient V_3 et V_4 les valeurs mesurées en ces points.

25 Des combinaisons de même nature mais un peu plus complexes que celles exposées dans l'exemple 1 permettent dans ce cas de déterminer les composantes F_x , F_y , F_z et N y compris dans les cas où le couple d'auto-alignement n'est pas uniquement dépendant des composantes F_x , F_y et F_z .

30 Des vérifications expérimentales ont permis de se rendre compte que cette configuration de mesure donne en outre la possibilité de distinguer les effets de F_y et les effets du

carrossage ; par conséquent, dans une mise en œuvre tout particulièrement avantageuse, la méthode est valide aussi dans des conditions de carrossage significativement non nul et on peut évaluer l'angle de carrossage simultanément aux composantes F_x , F_y , F_z et N .

5

Considérons maintenant le cas où les mesures sont réalisées sur les deux flancs.

Détermination 3 :

- 10 On souhaite estimer les composantes des efforts appliqués dans l'aire de contact et le couple d'auto-alignement à partir de mesures de l'extension circonférentielle des deux flancs du pneumatique mesurée en deux azimuts sur chaque flanc. Les azimuts de mesure sont choisis de façon symétrique par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact ($180^\circ + \alpha^\circ$ et $180^\circ - \alpha^\circ$). α doit être différent de α_0 pour pouvoir estimer F_z .
- 15 Soient V_1^1 et V_2^1 les valeurs mesurées à ces azimuts sur le premier flanc, et V_1^2 et V_2^2 les valeurs mesurées à ces azimuts sur le second flanc.

Grâce à ces quatre valeurs, il est possible de déterminer les composantes en utilisant la décomposition suivant les parités en azimut et en flanc :

20

- $V_1^1 + V_1^2 + V_2^1 + V_2^2$ donne la composante paire en azimut et en flanc. Cette combinaison est donc directement liée à F_z . Une estimation de F_z est donnée par $f_z(a_1 V_1^1 + a_2 V_2^1 + b_1 V_1^2 + b_2 V_2^2)$ où a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont des réels positifs et f_z une fonction continue. Les coefficients a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont par exemple déterminés de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre F_z et $a_1 V_1^1 + a_2 V_2^1 + b_1 V_1^2 + b_2 V_2^2$.
- $V_1^1 + V_1^2 - (V_2^1 + V_2^2)$ donne la composante impaire en azimut et paire en flanc. Cette combinaison est donc directement liée à F_x . Une estimation de F_x est donnée par $f_x(c_1 V_1^1 - c_2 V_2^1 + d_1 V_1^2 - d_2 V_2^2)$ où c_1 , c_2 , d_1 et d_2 sont des réels positifs et f_x une fonction continue. Les coefficients c_1 , c_2 , d_1 et d_2 sont par exemple déterminés de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre F_x et $c_1 V_1^1 - c_2 V_2^1 + d_1 V_1^2 - d_2 V_2^2$.

30

- $V_1^1 - V_1^2 + (V_2^1 - V_2^2)$ donne la composante paire en azimuth et impaire en flanc. Cette combinaison est donc directement liée à F_y . Une estimation de F_y est donnée par $f_y(e_1 V_1^1 + e_2 V_2^1 - f_1 V_1^2 - f_2 V_2^2)$ où e_1 , e_2 , f_1 et f_2 sont des réels positifs et f_y une fonction continue. Les coefficients e_1 , e_2 , f_1 et f_2 sont par exemple déterminés de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre F_y et $e_1 V_1^1 + e_2 V_2^1 - f_1 V_1^2 - f_2 V_2^2$
- $V_1^1 - V_1^2 - (V_2^1 - V_2^2)$ donne la composante impaire en azimuth et impaire en flanc. Cette combinaison est donc directement liée à N . Une estimation de N est donnée par $f_n(g_1 V_1^1 - g_2 V_2^1 - h_1 V_1^2 + h_2 V_2^2)$ où g_1 , g_2 , h_1 et h_2 sont des réels positifs et f_n une fonction continue. Les coefficients g_1 , g_2 , h_1 et h_2 sont par exemple déterminés de manière à optimiser le coefficient de corrélation entre N et $g_1 V_1^1 - g_2 V_2^1 - h_1 V_1^2 + h_2 V_2^2$

Par ce type de disposition, on utilise au maximum les symétries du pneumatique et pouvons espérer une très bonne précision de la reconstruction des composantes de la sollicitation appliquée dans l'aire de contact.

Détermination 4 :

On souhaite estimer les composantes des efforts appliqués dans l'aire de contact et le couple d'auto-alignement à partir de mesures de l'extension circonférentielle des deux flancs du pneumatique mesurée en trois azimuths sur chaque flanc. Les azimuths de mesure sont choisis de la manière suivante :

- Deux azimuths choisis de façon symétrique par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact ($180^\circ + \alpha^\circ$ et $180^\circ - \alpha^\circ$). Soient V_1^1 et V_2^1 les valeurs mesurées à ces azimuths sur le premier flanc, et V_1^2 et V_2^2 les valeurs mesurées à ces azimuths sur le second flanc
- Un azimuth correspondant au centre de l'aire de contact. Soient V_c^1 et V_c^2 les valeurs mesurées à ces azimuths.

Le traitement est similaire à celui de la détermination 3. Les valeurs V_c^1 et V_c^2 permettent une certaine redondance de l'information mais surtout une meilleure estimation de la composante Fz.

- 5 Dans le cas où α est pris égal à α_0 , on obtient l'information sur Fz grâce à V_c^1 et V_c^2 et l'information sur Fx, Fy et N par V_1^1 , V_1^2 , V_2^1 et V_2^2 . On utilise ainsi une possibilité supplémentaire de découplage des différentes contributions.

10 Avantageusement, dans le but d'affiner les estimations des composantes des efforts et de prendre en compte le fonctionnement non linéaire du pneu, la méthode décrite fait appel à des fonctions de transfert plus évoluées pour relier les mesures aux estimations des efforts. Toute fonction d'interpolation permettant d'établir un lien entre les grandeurs mesurées et les valeurs des composantes de la sollicitation appliquée peut être utilisée dans ce cadre.

15 Bien que tous les exemples listés ici utilisent des azimuts de mesure choisis pour tirer parti au mieux des symétries du pneu et faciliter la reconstruction, le choix de la position de azimuts auxquels les valeurs sont mesurées est libre (la symétrie des azimuts n'est pas en soi obligatoire) car toute combinaison d'un nombre suffisant de mesures
20 permet une estimation des composantes de la sollicitation appliquée. Il est possible, dans ce cas de rechercher directement les fonctions donnant les composantes Fx, Fy, Fz, N et γ en fonction des mesures d'extension circonférentielle du ou des flancs en des azimuts connus. La détermination des fonctions de transfert n'est plus nécessairement basée sur l'analyse de la mécanique du pneumatique mais sur la réponse du
25 pneumatique en terme d'extension circonférentielle du ou des flancs aux efforts qu'il subit.

Que les azimuts de mesure soient choisis grâce à une analyse physique ou décidés de manière plus arbitraire, les réseaux de neurones semblent bien adaptés pour établir une
30 fonction de transfert entre les mesures réalisées et les composantes des efforts Fx, Fy, Fz et N. Parmi les schémas les plus simples applicables, on peut retenir l'utilisation de réseaux à une couche de neurones cachés et une couche de neurones de sortie. Ces

neurones cachés utilisent une fonction de transfert sigmoïde. Les neurones de sortie utilisent quant à eux une fonction de transfert linéaire (figure 15). La propriété de parcimonie de ce type de réseau employé comme approximateur est ici très intéressante. Il est possible d'utiliser un réseau par composante à estimer ou un réseau permettant grâce à plusieurs sorties d'estimer toutes les composantes.

Si les azimuts de mesure ont été choisis de manière à tirer parti des symétries ou de remarques physiques, il peut être intéressant de réaliser des combinaisons linéaires entre les grandeurs avant l'entrée dans le réseau. Dans ce cas, une analyse en composantes principales permettra de déterminer de façon judicieuse les coefficients de ces combinaisons et simplifiera le réseau de neurones nécessaire. On obtient l'architecture décrite sur la figure 16.

Concrètement, on opère de la façon suivante :

- La première étape consiste après avoir déterminé les azimuts de mesure à recueillir les valeurs de l'extension circonférentielle du ou des flancs lors de sollicitations variées du pneumatique choisies de façon à couvrir tout le domaine dans lequel l'évaluation des efforts sera permise en utilisation normale. Les sollicitations choisies doivent aussi mettre en œuvre tous les couplages susceptibles d'être rencontrés lors d'une utilisation normale. L'ensemble de valeurs mesurées et des efforts associés (obtenus par un autre moyen de mesure) constitue la base d'apprentissage.
- La seconde étape consiste à réaliser l'apprentissage des poids du réseau sur la base ainsi constituée. A l'issue de cette phase, on dispose des fonctions de transfert.
- Une troisième étape consiste à tester les fonctions de transfert en confrontant les estimations des composantes d'effort aux efforts indiqués par un autre moyen de mesure.

Outre les réseaux de neurones, il est possible d'employer par exemple des fonctions polynomiales.

Dans le cas où la pression de gonflage du pneumatique est susceptible de changer au cours du temps, il peut être très utile, en fonction de la précision souhaitée pour la mesure des composantes recherchées, de prendre en compte les variations de pression.

- 5 Une première manière de procéder consiste à corriger les efforts estimés en sortie de fonction de transfert en fonction de la pression. Il est ainsi possible de réaliser une correction au premier ordre. En effet, soit une sollicitation appliquée sur le pneu dans le cas d'une fonction de transfert ne prenant pas en compte la pression. Si la pression est double de la pression de référence (à laquelle la fonction de transfert a été établie), la
- 10 fonction de transfert verra environ deux fois moins de déformations mesurées en entrée que pour la pression de référence. Elle évaluera donc des efforts deux fois plus faibles que les efforts réellement appliqués. Il convient de multiplier par deux les efforts estimés.
- 15 Toutefois, l'approche la plus précise consiste à introduire la pression comme paramètre dans les fonctions de transfert. Ceci implique :
- ♦ De réaliser l'apprentissage de la ou des fonctions de transfert sur une base d'apprentissage contenant des cas de sollicitation du pneumatique sous différentes conditions de pression de gonflage couvrant le domaine de fonctionnement souhaité.
 - 20 ♦ De disposer d'une mesure ou d'une estimation de la pression de gonflage.

De manière non limitative, on décrit ci-dessous deux manières de connaître la pression.

- La première consiste à utiliser une mesure de pression donnée par un capteur de
- 25 pression différent des capteurs spécifiques de l'invention. La valeur de pression mesurée est alors fournie au système, en plus des valeurs de déformations aux azimuts à la ou aux fonctions de transfert. La figure 17a schématise l'architecture associée.

- La seconde approche consiste à estimer la pression de gonflage à partir des mesures de
- 30 déformation circonférentielle des flancs. En effet, les signaux de déformation présentent une composante structurale et une composante pneumatique ce qui permet par leur analyse de capturer une information sur la pression de gonflage.

Cette façon de faire nécessite de déterminer une fonction de transfert prenant en entrée les mesures de déformation aux azimuts souhaités et donnant, sur le domaine de fonctionnement désiré, une estimation de la pression de gonflage. La même
5 méthodologie que celle présentée précédemment est applicable :

- ◆ Constitution d'une base d'apprentissage mêlant variations d'efforts appliqués et de pression de gonflage.
- ◆ Détermination d'une fonction de transfert par apprentissage.

10 En pratique, si la précision d'une détermination de pression faite comme indiqué ci-dessus est jugée insuffisante pour une mise en œuvre particulière de l'invention, il est possible de l'améliorer facilement. En effet, l'évolution de la pression dans un pneumatique est un phénomène lent par rapport à la rotation du pneumatique. On peut donc moyenner ou filtrer les estimations de pression de manière à ne conserver que les
15 composantes basses fréquences. On obtient alors une bonne estimation de la pression de gonflage. La figure 17b schématise l'architecture qui résulte de cette approche. En plus de la connaissance des résultantes d'efforts recherchées, la méthode fournit alors, sans capteur supplémentaire, une estimation de la pression de gonflage.

20 Naturellement, bien d'autres variables (en plus des mesures d'extension circonférentielle) peuvent être prises en compte selon le même principe pour améliorer l'efficacité de cette détermination (par exemple la température du pneumatique).

De manière générale, le nombre de points de mesure peut être plus important que les
25 configurations minimales présentées dans les exemples et permettre un résultat plus précis ou plus sûr du fait de la redondance des informations disponibles.

La mesure de l'extension circonférentielle du ou des flancs du pneumatique peut se faire de n'importe quelle manière, par un dispositif externe ou un dispositif interne au pneu.
30 A titre d'exemple, on décrit ici pour réaliser la mesure de l'extension circonférentielle l'utilisation d'un ou de capteurs placés dans le pneu et donc entraînés en rotation par le pneu.

Ce ou ces capteurs intégrés au pneu, par exemple dans un flanc du pneu, et mesurant localement l'extension circonférentielle du ou des flancs peuvent faire appel à n'importe quel principe physique de mesure. Il peut par exemple s'agir de capteurs diélectriques mesurant une variation de capacité liée à la distance qui sépare deux électrodes. Les électrodes peuvent être constituées d'un fil conducteur placé de manière radiale dans le flanc. Cette disposition permet une mesure de « l'écart fils » par mesure de la capacité entre les électrodes. S'il est actif, le capteur peut être alimenté soit par le véhicule par téléalimentation soit par une batterie embarquée sur la roue ou dans le pneu ou par tout autre moyen. Tout est aussi possible en ce qui concerne la transmission de l'information vers le véhicule, par voie radio ou autre. Le capteur en lui même doit pouvoir fournir une information en continu ou avec une fréquence de rafraîchissement suffisamment rapide par rapport à la période de rotation de la roue.

15 Cette approche utilisant un capteur intégré au pneu a l'avantage de permettre une connaissance de l'extension circonférentielle du ou des flancs à tous les azimuts du pneumatique puisque un capteur, entraîné par le pneu, explore l'ensemble des azimuts lors d'une rotation de la roue.

20 La méthode de reconstruction des composantes des efforts étant basée sur la mesure de l'extension circonférentielle à certains azimuts, se pose le problème de la localisation du capteur pour extraire les valeurs aux bons azimuts.

Le capteur est interrogé à une fréquence constante et connue. Il délivre donc un signal temporel de la variation de l'extension circonférentielle locale. Un signal mesuré est présenté en figure 18. Sur ce signal temporel, On reconnaît aisément la signature d'un tour de roue que l'on a observée précédemment (figures 10a, 10b, 11a, 11b, 12a, 12b). Outre la signature de chaque tour de roue, ce signal est bruité. La première opération consiste à réduire ce bruit en appliquant un filtre passe bas dont la fréquence de coupure peut être liée à la vitesse de rotation de la roue.

Plusieurs cas de figure peuvent alors se présenter suivant les équipements disponibles :

- Si l'on dispose d'une mesure de la position angulaire de la roue, il est possible de connaître les instants auxquels le capteur passe à l'azimut de mesure. La lecture des valeurs mesurées à ces instants fournit la valeur de l'extension circonférentielle aux azimuts désirés. Cette mesure de la position angulaire de la roue peut, par exemple
5 être obtenue par un comptage des transitions d'un capteur ABS de vitesse de rotation de la roue.
- Si aucun dispositif externe n'est disponible pour faciliter la localisation du capteur, on ne peut utiliser que le signal du capteur lui-même. L'invention propose d'utiliser le signal du capteur pour estimer la position angulaire de la roue.

10

Chaque passage du capteur dans l'aire de contact a pour signature une très forte extension circonférentielle des flancs du pneumatique. En utilisant cette observation, il est possible de trouver les instants où le capteur passe au centre de l'aire de contact. La méthode la plus simple pour réaliser cette opération consiste à réaliser un seuillage du
15 signal filtré et à rechercher les maxima parmi les valeurs supérieures à ce seuil (figure 19). Cette approche permet de ne pas détecter les maxima qui ne correspondent pas au passage dans l'aire de contact.

A chaque détermination d'un nouveau passage dans l'aire de contact, la connaissance
20 des instants des derniers passages (au moins 3 passages) permet d'estimer la vitesse de rotation de la roue et son accélération. Grâce à ces estimations, il est possible de reconstruire une évaluation de l'azimut auquel le capteur se trouve en fonction du temps. Il devient alors possible d'extraire des mesures en fonction du temps les valeurs à certains azimuts.

25

Plusieurs possibilités s'offrent alors pour la mise en œuvre de la mesure. En effet, la détermination des composantes des efforts nécessite des mesures à plusieurs azimuts.

Une première approche consiste à n'utiliser qu'un capteur sur chaque flanc pour lequel
30 on souhaite avoir des mesures. A chaque passage à une position requise, la valeur donnée par le capteur est prise en compte pour rafraîchir la mesure à l'azimut considéré. En faisant l'hypothèse que les composantes des efforts varient lentement par rapport à la

vitesse de rotation de la roue, un seul capteur permet ainsi d'obtenir les mesures à tous les azimuts nécessaires à la reconstruction des efforts. La figure 20 présente ce type de fonctionnement avec un modèle (fonction de transfert) qui nécessite des mesures à trois azimuts (0° , 120° et 240°).

5

Une deuxième approche consiste à disposer plusieurs capteurs sur la circonférence de façon à ce qu'au moins une fois par tour les capteurs se trouvent simultanément aux azimuts auxquels on désire réaliser une mesure. Il est ainsi possible d'obtenir une image de la déformation du pneu en différents azimuts à un instant donné ce qui ne nécessite plus que les efforts varient lentement par rapport à la rotation de la roue. Une variante de cette approche consiste à disposer les capteurs de manière équi-répartie autour du pneu. Ainsi, dans le cas où l'on a placé N capteurs, la situation où les capteurs sont bien positionnés se produit au moins N fois par tour. La figure 21 présente ce type de fonctionnement avec trois capteurs qui tombent trois fois par tour sur les azimuts où la mesure doit être réalisée (0° , 120° et 240°).

15

Enfin, il est possible de mixer les approches précédentes.

L'augmentation du nombre de capteurs permet en particulier :

- 20 • d'augmenter la fréquence de rafraîchissement de l'estimation des efforts,
- d'augmenter la robustesse vis à vis des variations rapides des composantes des efforts appliqués dans l'aire de contact.

Notons que plusieurs modèles peuvent être déterminés qui prennent en entrée les mesures à des azimuts différents. Même avec un unique capteur, il est ainsi possible d'obtenir plusieurs estimations à chaque tour de roue. La figure 22 donne un exemple dans lequel trois capteurs sont utilisés. Deux fonctions de transfert sont déterminées. La première utilise des mesures à 0° , 120° et 240° , la seconde à 60° , 180° et 300° . Lorsque les capteurs tombent sur les positions de mesures désirées, la fonction de transfert peut être appliquée. En gérant convenablement les capteurs, il est même possible dans ce type de disposition de réaliser une estimation des efforts 6 fois par tour de roue. Ces

30

estimations par plusieurs modèles peuvent être moyennées ou confrontées pour augmenter la précision et diminuer le bruit dans l'estimation des efforts.

La figure 23 résume la démarche de l'invention qui chaîne l'estimation des composantes d'efforts appliquées sur le pneu à partir de mesures d'extension circonférentielle et l'estimation du niveau d'adhérence à partir de ces données.

Revenons au domaine D. Celui-ci est plus ou moins étendu selon les pneus (et pouvant même ne pas exister) sur la figure 9 correspond à une zone où il peut exister plusieurs quadruplets (F_x, F_y, F_z, μ) dont l'image par f est le même couple d'auto-alignement N . Il n'est par conséquent pas possible de trouver directement une fonction inverse g sur ce domaine.

Il est néanmoins possible, en utilisant une technique de codage (par exemple une technique de codage semi-distribué), de proposer plusieurs valeurs de μ lorsqu'un quadruplet F_x, F_y, F_z, N de ce domaine est rencontré. A chaque valeur de μ proposée, on peut alors associer une probabilité. Si elles permettent d'améliorer les résultats, ces méthodes présentent toujours le problème du choix de la bonne valeur de μ à retenir.

Des propriétés de continuité dans le temps peuvent aider à choisir. Imaginons que, au cours du temps, le point de fonctionnement de l'ensemble monté passe du domaine C au domaine B puis D (figure 9). Dans les domaines C et B, l'estimation de μ était proche de μ_1 . Imaginons que, dans le domaine D, on soit subitement confronté à deux valeurs possibles de μ . Par continuité, on peut choisir la valeur la plus proche de μ_1 en faisant l'hypothèse que le sol n'évoluerait pas si rapidement. Toutefois, si l'indétermination subsiste après quelques évaluations supplémentaires, il se peut réellement que le sol ait changé. Dans ce cas, on ne peut écarter la valeur différente de μ_1 . Il est alors à nouveau nécessaire de faire un choix.

Comme on le voit, l'existence dans certains cas de ce domaine non inversible peut rendre la méthode exposée précédemment difficile à utiliser (par exemple pour des

raisons de sécurité). Des méthodes levant à coup sur cette indétermination sont par conséquent particulièrement intéressantes.

Le déplacement du point d'application des forces dans l'aire de contact peut avoir lieu
 5 suivant la direction X d'une valeur dx ou la direction Y d'une valeur dy . Le fait de ne mesurer que F_x , F_y , F_z et N ne permet pas de déterminer indépendamment dx et dy . Il en résulte une indétermination sur la position, indétermination qui peut créer le problème de non inversibilité.

10 On a pu montrer que la connaissance d'informations supplémentaires permettrait de rendre le domaine D inversible. Considérons par exemple l'approche suivante. Le couple d'auto-alignement N peut se décomposer de la manière suivante :

$$N = F_y \cdot dx - F_x \cdot dy = N_y - N_x,$$

dx et dy étant les coordonnées du point d'application de la résultante des forces F_x
 15 et F_y .

Le fait d'utiliser N_x et N_y à la place de N permet de trouver une fonction définie sur l'ensemble du domaine de sollicitations créant un glissement partiel donnant une estimation de μ . Il n'y a dans ce cas aucune ambiguïté sur les valeurs de μ dans tout le
 20 domaine. Connaître à la fois N_x , N_y et les efforts permet de localiser le point d'application des forces dans l'aire de contact (les valeurs dx et dy ci-dessus) et d'en déduire μ .

Pour obtenir les valeurs de N_x et N_y , on peut par exemple mesurer les trois couples L ,
 25 M , N . (L : moment autour de l'axe X, M autour de l'axe Y et N autour de Z). les valeurs de dx et de dy sont alors obtenues comme solution d'un système linéaire. En effet, si dx , dy et dz sont les coordonnées du point d'application de la force, on peut écrire :

$$L = F_z \cdot dy - F_y \cdot dz$$

$$M = F_x \cdot dz - F_z \cdot dx$$

30
$$N = F_y \cdot dx - F_x \cdot dy$$

En considérant l'angle de carrossage comme petit, dz est très fortement lié à la charge Fz du pneumatique. Il est aussi possible de prendre en compte les corrections à introduire en fonction des efforts Fx et Fy appliqués. Pour un pneumatique donné dans des conditions connues (pression) le lien $dz = f(Fx, Fy, Fz, P)$ est connu avec une assez
 5 bonne précision par exemple par l'intermédiaire d'une fonction d'approximation tel un réseau de neurones.

Dans le cas d'une sollicitation principalement dans la direction Fx, on utilise la seconde relation pour obtenir $dx = \frac{Fx.dz - M}{Fz}$. dy est alors obtenu par la troisième
 10 relation $dy = \frac{Fy.dx - N}{Fx}$.

Dans le cas d'une sollicitation principalement dans la direction Fy, on utilise la première relation pour obtenir $dy = \frac{L + Fy.dz}{Fz}$. dx est alors obtenu par la troisième relation
 $dx = \frac{N + Fx.dy}{Fy}$.

15 Dans le cas de sollicitations couplées, il est possible d'utiliser l'une ou l'autre des relations ou les deux de manière à augmenter la précision. Connaissant dx et dy, l'éventuelle indétermination est levée.

20 La mise en œuvre particulière de la méthode proposée pour estimer le coefficient d'adhérence maxi nécessite de solliciter le pneu par des efforts Fx, Fy ou les deux combinés. En effet, la démarche présentée ci-dessus suppose qu'il existe une zone de glissement dans l'aire de contact. Grâce à cette méthode, on obtient une estimation de la limite d'adhérence avant de l'atteindre. Toutefois, lorsque le pneu est très peu sollicité
 25 (absence de glissement de l'aire de contact), l'estimation est plus problématique ou du moins est de préférence accompagnée d'un indice de confiance déterminé par un apprentissage comme indiqué ci-dessous.

- ♦ Dans une phase d'apprentissage, on détermine en plus du modèle $\mu = g(F_x, F_y, F_z, N, \dots)$ un modèle $N_{adh} = f(F_x, F_y, F_z, \dots)$ qui représente la valeur de N lorsque le pneu est parfaitement adhérent (μ très grand).
- ♦ Dans une phase d'utilisation, F_x, F_y, F_z et N sont estimés à l'aide de la mesure d'extension circonférentielle. F_x, F_y et F_z permettent de déterminer N_{adh} . On estime un indice de confiance en choisissant un seuil et en comparant N et N_{adh} comme suit :
 - ♦ Si $|N| - |N_{adh}| < \text{Seuil}$, alors le contact du pneu au sol est considéré comme adhérent et la détermination de μ est jugée non fiable.
 - ♦ Si $|N| - |N_{adh}| > \text{Seuil}$, alors la zone de glissement dans le contact est suffisante et l'estimation de μ est fiable.

Une valeur de seuil de l'ordre de 1 m.daN sur une enveloppe tourisme permet de déterminer de façon suffisamment fiable si le modèle est utilisable. Cette valeur correspond à utiliser le modèle à partir d'un pourcentage d'utilisation du potentiel maxi de l'ordre de 50 %.

Pour obtenir une grandeur correctement évaluée dès les basses sollicitations, il est proposé de s'intéresser au pourcentage de potentiel d'adhérence utilisé défini de la façon suivante :

$$p_u = \frac{\mu_{\text{utilisé}}}{\mu} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\mu \cdot F_z}$$

Cette grandeur présente l'intérêt d'être plus facilement correctement estimée en grandeur absolue quelle que soit la sollicitation, même faible, appliquée au pneu. On l'obtient de manière directe par exemple par un réseau de neurones en appliquant la démarche présentée pour l'estimation de μ . La figure 19 présente un exemple de reconstruction du potentiel d'adhérence maxi et du pourcentage de potentiel utilisé. Le couple moteur ou freineur (glissement lié à F_x) et la force transversale (dérive liée à F_y) varient au cours du temps ainsi que le sol sur lequel roule le véhicule. La charge F_z est imposée. Lorsque la sollicitation du pneu est faible (F_x et F_y faibles simultanément) par

exemple au temps 4 s, la qualité de l'estimation du potentiel d'adhérence maxi chute. L'estimation du pourcentage de potentiel utilisé reste quant à elle tout à fait correcte.

5 Dans ce cas, une mise en œuvre particulière de la méthode proposée consiste à établir une fonction de transfert entre les mesures, les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu, et le pourcentage de potentiel d'adhérence utilisé

défini par $p_u = \frac{\mu_{utilisé}}{\mu} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\mu \cdot F_z}$ par les étapes suivantes :

- 10 - constitution d'une base de données contenant F_x , F_y , F_z , N et p_u pour un ensemble de sollicitations du pneu sur des sols présentant des coefficients d'adhérence différents, les paramètres F_x , F_y , F_z et μ étant imposées au pneu, la valeur du couple d'auto-alignement N étant mesurée,
- détermination par apprentissage des poids d'un réseau de neurones permettant de reconstruire directement p_u à partir de la connaissance de F_x , F_y , F_z et N .

15

Dans le cadre d'une utilisation par un système embarqué dans un véhicule (système mécatronique, par exemple de type ESP ou ABS), il est intéressant de disposer d'une grandeur définie sur tout le domaine d'utilisation. Il est par exemple envisageable d'utiliser le pourcentage de potentiel d'adhérence utilisé pour affiner les mécanismes de
20 régulation des systèmes ABS ou ESP.

REVENDICATIONS

- 5 1. Méthode de détermination du coefficient d'adhérence μ dans l'aire de contact d'un pneu sur une chaussée, comportant les étapes suivantes :
- déterminer les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu,
 - 10 • traiter les signaux d'évaluation des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu de façon à en extraire ledit coefficient d'adhérence μ .
- 15 2. Méthode selon la revendication 1, dans laquelle la détermination des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu comporte les étapes suivantes :
- sélectionner plusieurs points fixes dans l'espace, situés à des azimuts différents
 - 20 le long de la circonférence dans au moins un flanc du pneu,
 - effectuer autant de mesures de variation de distance circonférentielle (extension ou contraction) à ces points fixes lorsque le pneu roule sur la chaussée
 - traiter les signaux de mesure de façon à en extraire les trois composantes d'une
 - 25 résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu.
3. Méthode selon la revendication 2, dans laquelle la détermination des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu est déduite
- 30 d'au moins cinq mesures de variation de distance circonférentielle (extension ou contraction) effectuées dans au moins un flanc du pneu, en cinq points fixes dans l'espace, situés à des azimuts différents le long de la circonférence, puis ledit

coefficient d'adhérence μ est déduit de la détermination des trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et du couple d'auto-alignement généré par le pneu.

5 4. Méthode selon la revendication 2, caractérisée en ce que la mesure de la variation circonférentielle est effectuée par au moins un capteur intégré dans un flanc du pneu, le signal délivré par ledit capteur étant traité pour relever sa valeur en plusieurs azimuts correspondant auxdits points fixes.

10 5. Méthode selon la revendication 2, caractérisée en ce que la mesure de la variation circonférentielle est effectuée par autant de capteurs que d'azimuts à observer, les capteurs étant externes au pneu et disposés dans l'espace fixe.

15 6. Méthode selon l'une des revendications 2 à 5, caractérisée en ce que l'on établit une fonction de transfert entre les mesures, les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu, et le coefficient d'adhérence maxi par les étapes suivantes :

- constitution d'une base de données contenant F_x , F_y , F_z , N et μ pour un
20 ensemble de sollicitations du pneu sur des sols présentant des coefficients d'adhérence différents, les paramètres F_x , F_y , F_z et μ étant imposées au pneu, la valeur du couple d'auto-alignement N étant mesurée,
- détermination par apprentissage des poids d'un réseau de neurones permettant de reconstruire μ à partir de la connaissance de F_x , F_y , F_z et N .

25

7. Méthode selon l'une des revendications 2 à 5, caractérisée en ce que l'on établit une fonction de transfert entre les mesures, les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu, et le pourcentage de potentiel d'adhérence

30 utilisé défini par $p_u = \frac{\mu_{utilisé}}{\mu} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\mu \cdot F_z}$ par les étapes suivantes :

- constitution d'une base de données contenant F_x , F_y , F_z , N et p_a pour un ensemble de sollicitations du pneu sur des sols présentant des coefficients d'adhérence différents, les paramètres F_x , F_y , F_z et μ étant imposées au pneu, la valeur du couple d'auto-alignement N étant mesurée,
- 5 - détermination par apprentissage des poids d'un réseau de neurones permettant de reconstruire directement p_a à partir de la connaissance de F_x , F_y , F_z et N .

8. Méthode selon l'une des revendications 2 à 5, caractérisée en ce que l'on établit une fonction de transfert entre les mesures, les trois composantes d'une résultante d'efforts exercés par la chaussée sur l'aire de contact d'un pneumatique et le couple d'auto-alignement généré par le pneu, et le coefficient d'adhérence maxi par les étapes suivantes :

- constitution d'une base de données contenant F_x , F_y , F_z , N et μ pour un ensemble de sollicitations du pneu sur des sols présentant des coefficients d'adhérence différents, les paramètres F_x , F_y , F_z et μ étant imposées au pneu, la valeur du couple d'auto-alignement N étant mesurée,
- 15 - calcul des valeurs réduites $\frac{F_x}{F_z}$, $\frac{F_y}{F_z}$, $\frac{N}{F_z}$,
- détermination par apprentissage des poids d'un réseau de neurones permettant de reconstruire μ à partir de la connaissance de $\frac{F_x}{F_z}$, $\frac{F_y}{F_z}$, $\frac{N}{F_z}$.

20

9. Méthode selon l'une des revendications 2 à 5 dans laquelle, étant posé que

$$N = F_y \cdot dx - F_x \cdot dy = N_y - N_x$$

où dx est la distance du point d'application de la force F_y au plan vertical passant par le centre de l'aire de contact et orthogonal à l'axe X ,

25 où dy est la distance du point d'application de la force F_x au plan vertical passant par le centre de l'aire de contact et orthogonal à l'axe Y ,

les valeurs de N_x et N_y sont obtenues à partir des mesures des trois couples L , M , N , L étant le moment autour de l'axe X , M le moment autour de l'axe Y et N le moment autour de Z .

30

10. Méthode selon la revendication 6 ou 7, utilisant un réseau de neurones du type perceptron.
11. Méthode selon l'une des revendications 2 à 9, caractérisée en ce que l'on estime la variation circonférentielle par la mesure de la distance entre les fils de la nappe carcasse dans les flancs.
12. Méthode selon l'une des revendications 2 à 10, caractérisée en ce que l'on estime la variation circonférentielle par la mesure de la distance entre des fils formant un capteur mesurant une variation de capacité liée à la distance qui sépare deux électrodes.
13. Méthode selon la revendication 2, caractérisée en ce qu'on utilise au moins trois points fixes dans l'espace définis tels que :
- un des points corresponde à l'azimut du centre de l'aire de contact ou l'azimut du point opposé à l'aire de contact ;
 - les deux autres points soient symétriques par rapport à un plan vertical passant par le centre de l'aire de contact.
14. Méthode selon la revendication 2 dans laquelle, les azimuts de mesure étant choisis de façon symétrique par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact ($180^\circ + \alpha^\circ$ et $180^\circ - \alpha^\circ$), avec α différent de α_0 , où α_0 est l'azimut en entrée de l'aire de contact, V_1^1 et V_2^1 étant les valeurs mesurées à ces azimuts sur le premier flanc, et V_1^2 et V_2^2 les valeurs mesurées à ces azimuts sur le second flanc, :
- $f_z(a_1 V_1^1 + a_2 V_2^1 + b_1 V_1^2 + b_2 V_2^2)$ où a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont des coefficients réels positifs et f_z une fonction continue est une estimation de la composante F_z ,
 - $f_x(c_1 V_1^1 - c_2 V_2^1 + d_1 V_1^2 - d_2 V_2^2)$ où c_1 , c_2 , d_1 et d_2 sont des coefficients réels positifs et f_x une fonction continue, est une estimation de la composante F_x ,
 - $f_y(e_1 V_1^1 + e_2 V_2^1 - f_1 V_1^2 - f_2 V_2^2)$ où e_1 , e_2 , f_1 et f_2 sont des coefficients réels positifs et f_y une fonction continue est une estimation de la composante F_y ,
 - $f_n(g_1 V_1^1 - g_2 V_2^1 - h_1 V_1^2 + h_2 V_2^2)$ où g_1 , g_2 , h_1 et h_2 sont des coefficients réels positifs et f_n une fonction continue est une estimation du couple d'auto-alignement N .

15. Méthode selon la revendication 2 dans laquelle, les azimuts de mesure étant choisis de façon symétrique par rapport à l'azimut du centre de l'aire de contact ($180^\circ + \alpha^\circ$ et $180^\circ - \alpha^\circ$), avec α différent de α_0 , où α_0 est l'azimut en entrée de l'aire de contact, et V_1 et V_2 étant les valeurs mesurées en ces autres azimuts,

- $f_x(V_2 - rV_1)$ où r est un coefficient réel positif et f_x une fonction continue est une estimation de F_x ,
- $f_z(V_c - (s_1V_1 + s_2V_2))$ où s_1 et s_2 sont des coefficients réels positifs et f_z une fonction continue est une estimation de F_z ,
- $f_y(V_c + u_1V_1 + u_2V_2)$ où u_1 et u_2 sont des coefficients réels positifs et f_y une fonction continue est une estimation de F_y ,

16. Méthode selon l'une quelconque des revendications précédentes dans laquelle on détermine un indice de confiance comme suit :

- ♦ Dans une phase d'apprentissage, on détermine un modèle $\mu = g(F_x, F_y, F_z, N, \dots)$ un modèle $N_{adh} = f(F_x, F_y, F_z, \dots)$ représentant la valeur de N lorsque le pneu est parfaitement adhérent ;
- ♦ Dans une phase d'utilisation, F_x, F_y, F_z et N sont estimés à l'aide de la mesure d'extension circonférentielle et on détermine N_{adh} ;
- ♦ Si $|N| - |N_{adh}| < \text{Seuil}$, alors le contact du pneu au sol est considéré comme adhérent et la détermination de μ est jugée non fiable.
- ♦ Si $|N| - |N_{adh}| > \text{Seuil}$, alors la zone de glissement dans le contact est suffisante et l'estimation de μ est fiable.

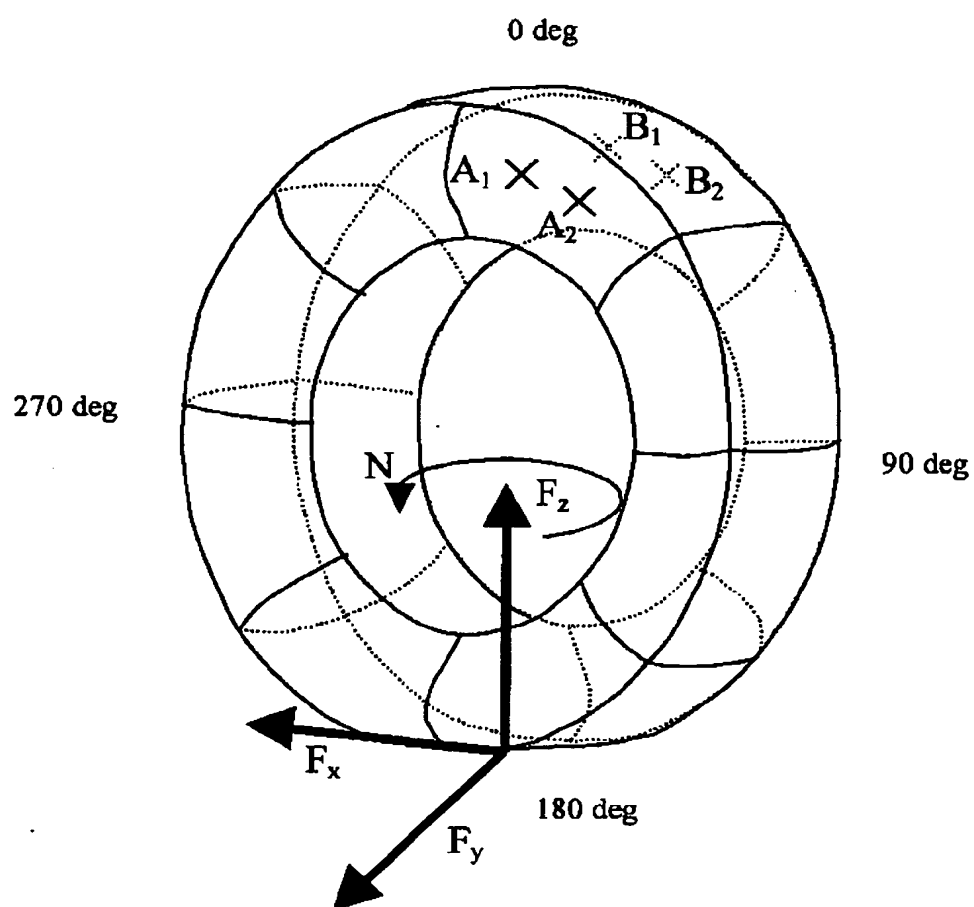


Figure 1

Figure 2

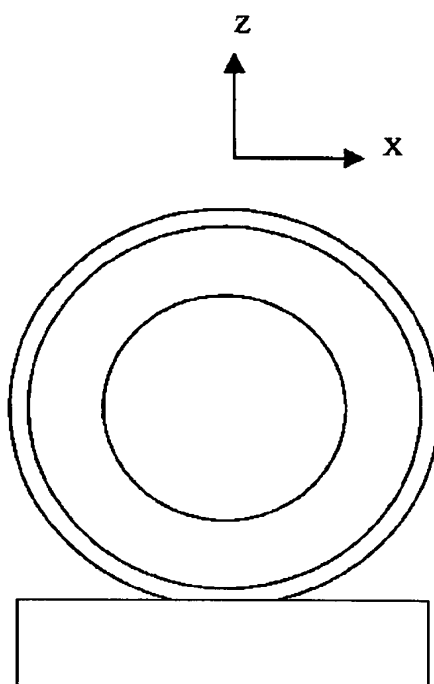
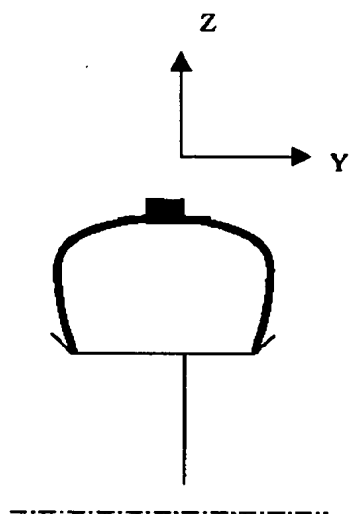


Figure 3

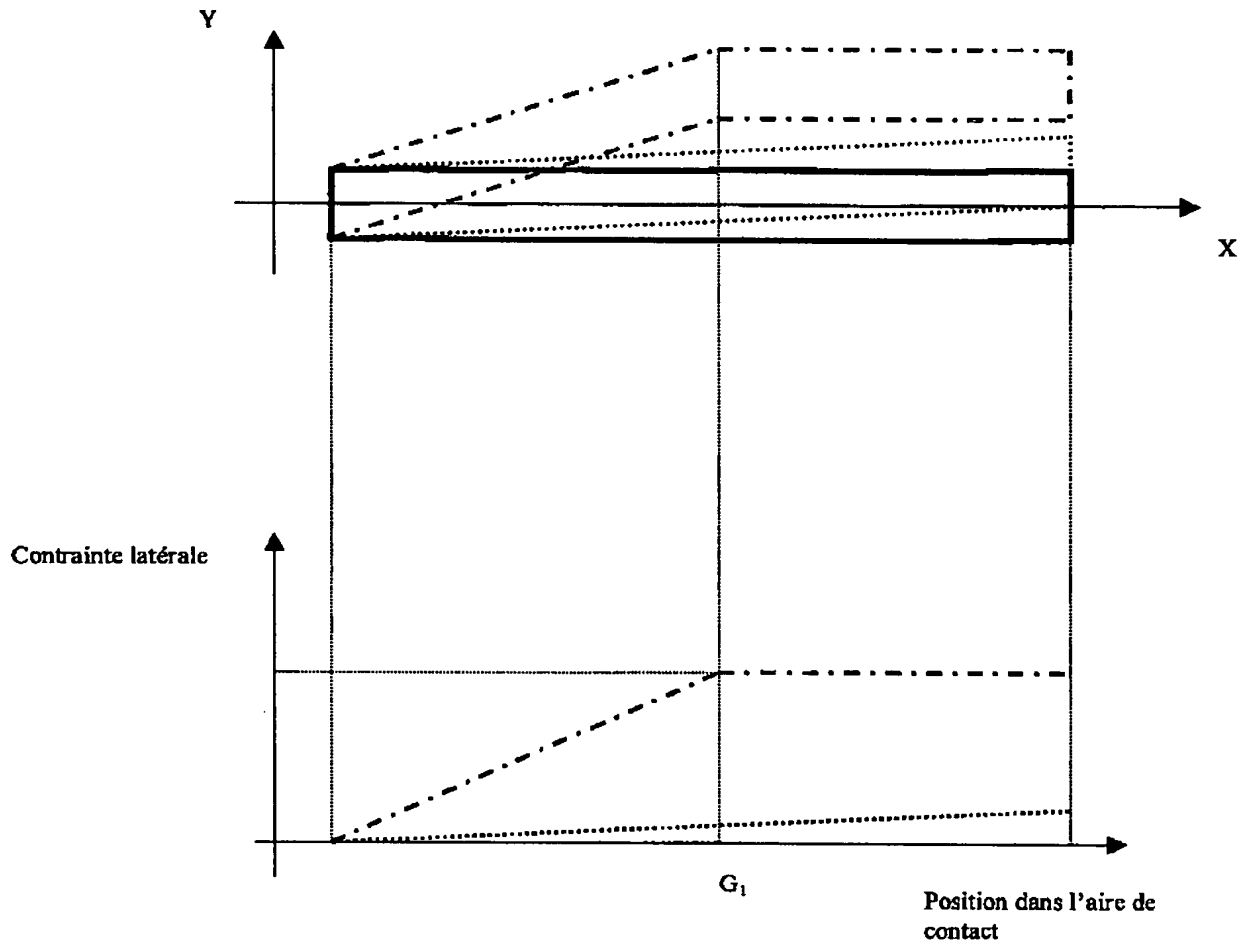


Figure 4

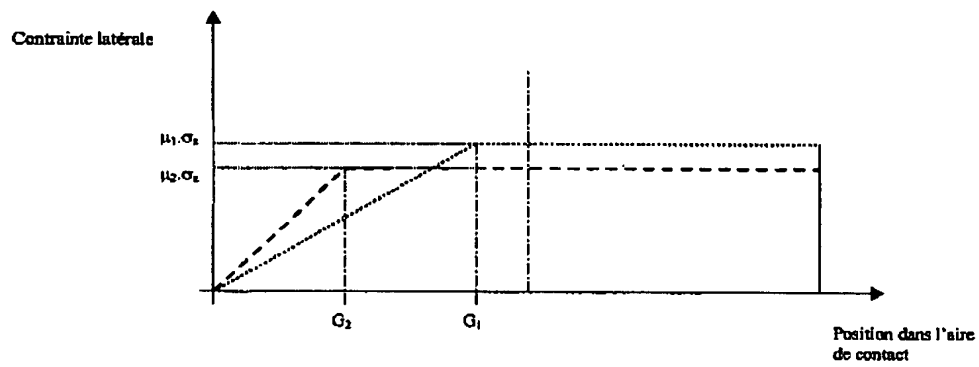


Figure 5

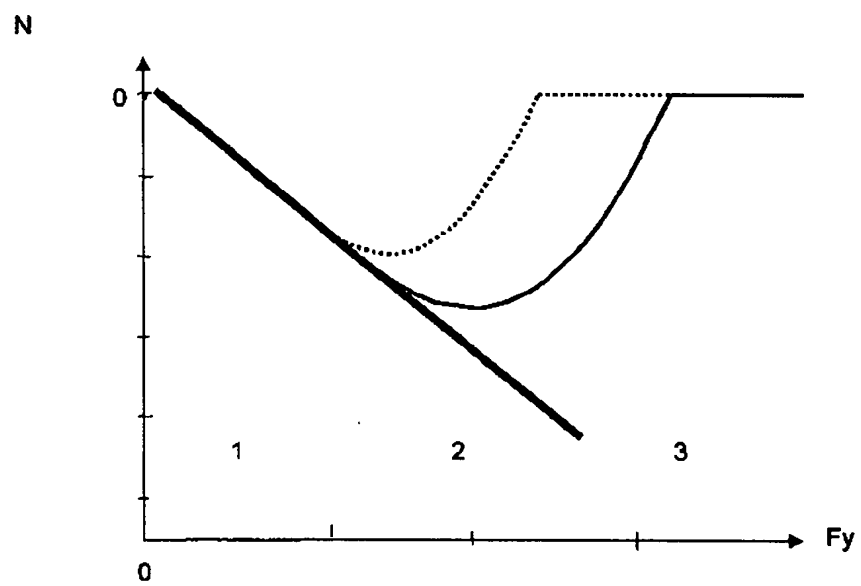


Figure 6

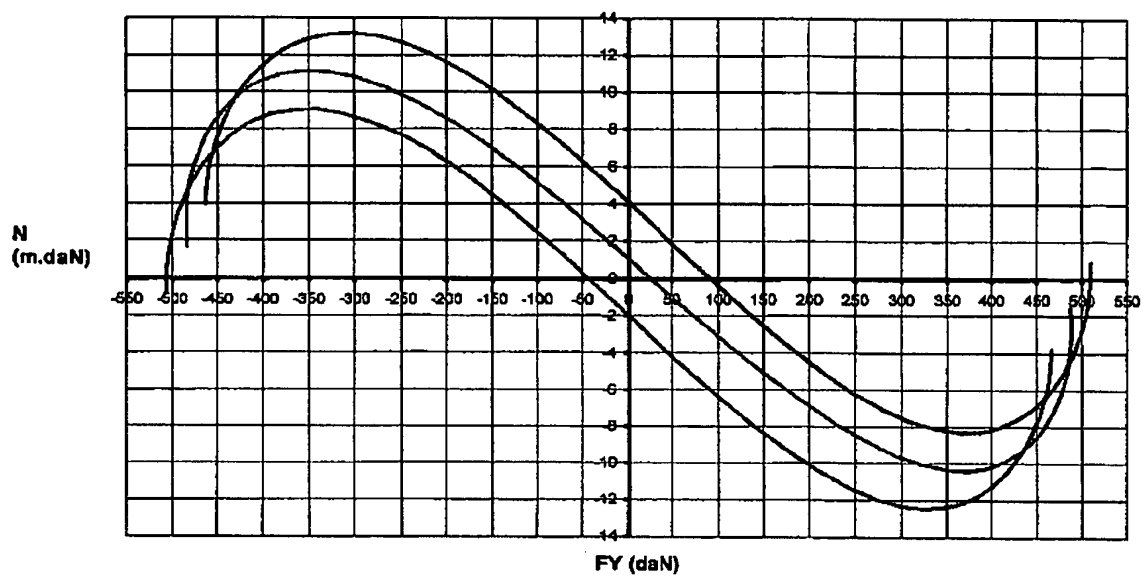


Figure 7

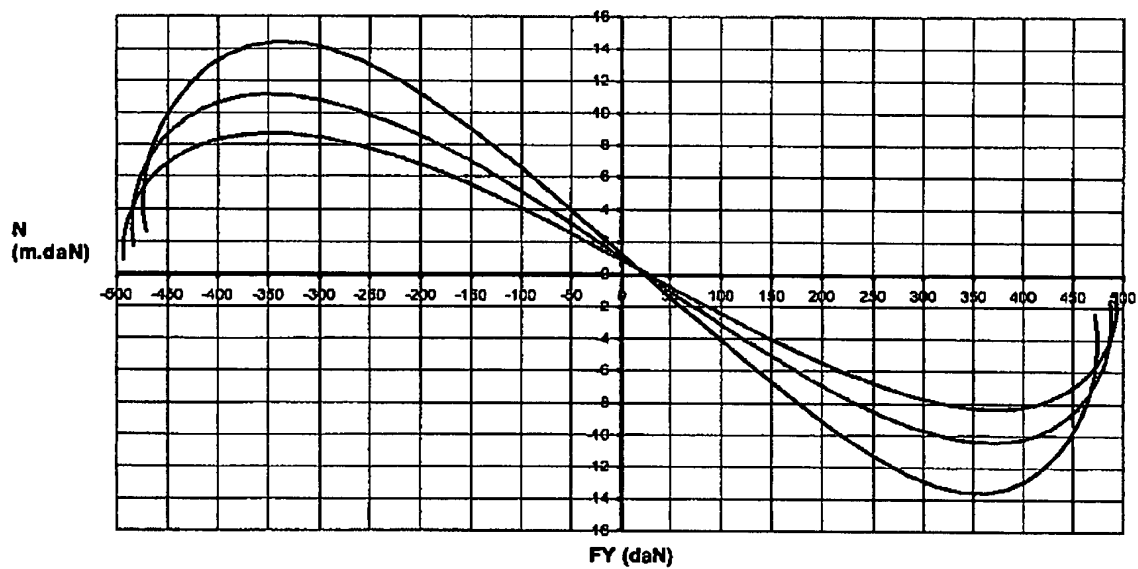


Figure 8

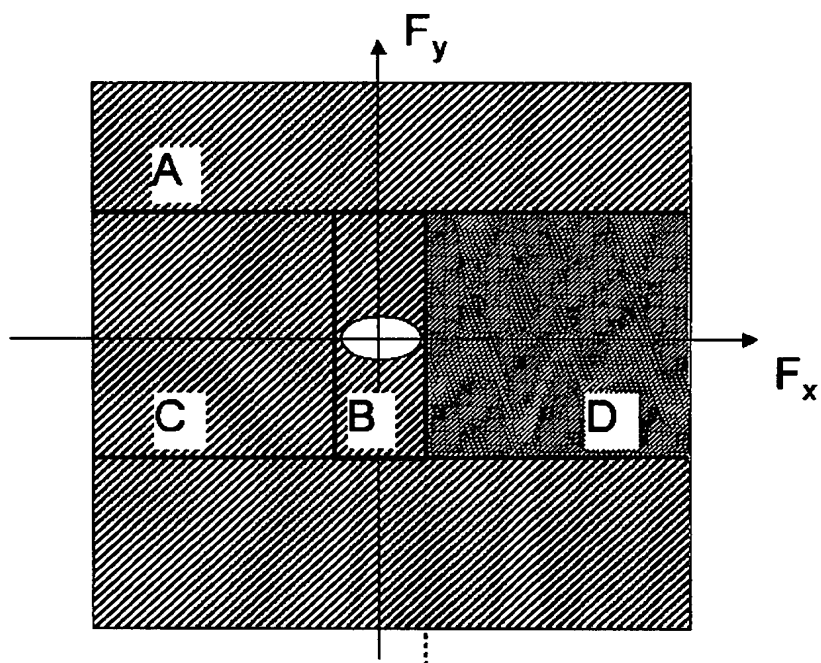


Figure 9

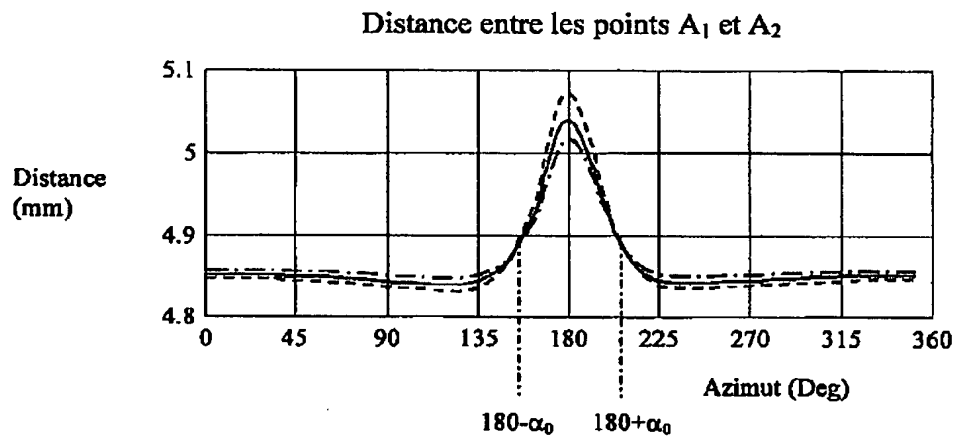


Figure 10a

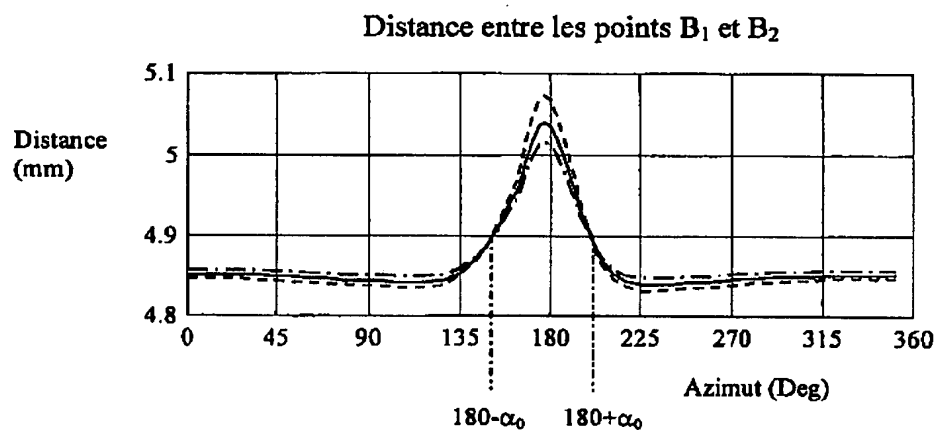


Figure 10b

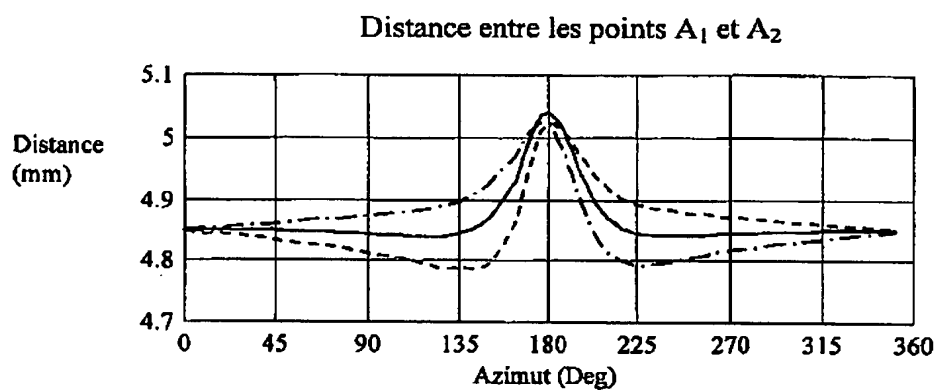


Figure 11a

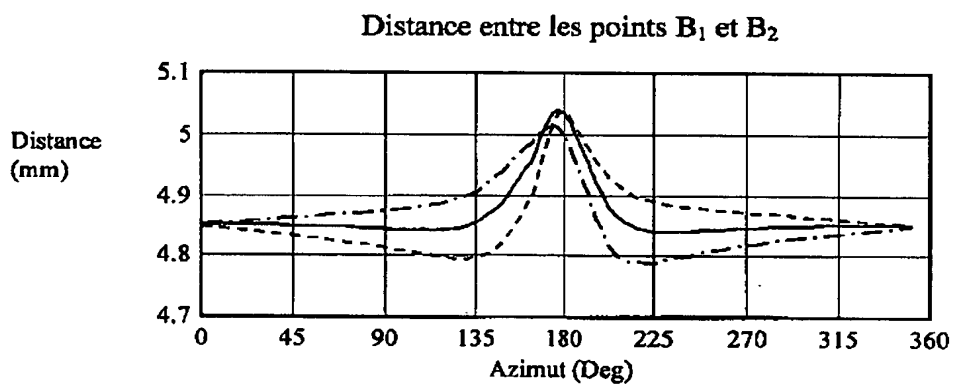


Figure 11b

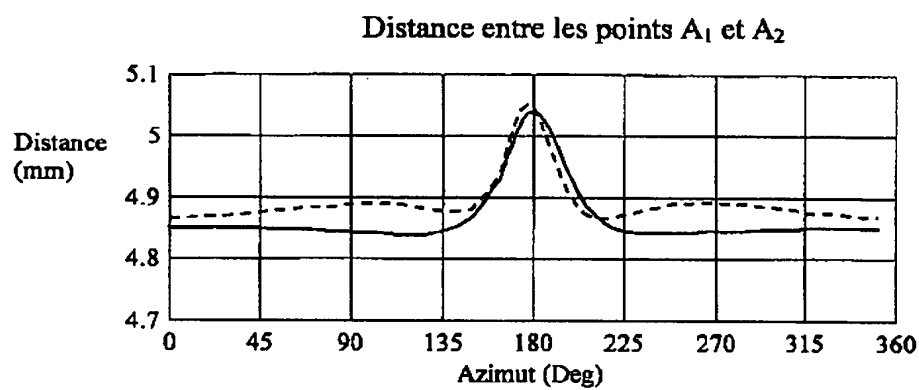


Figure 12a

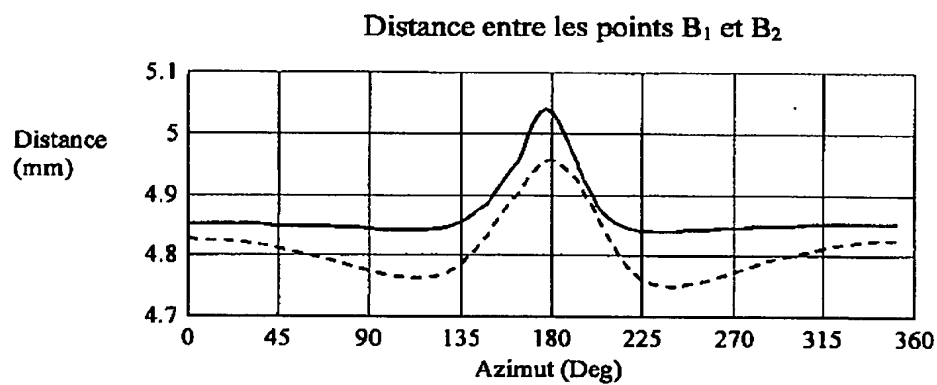


Figure 12b

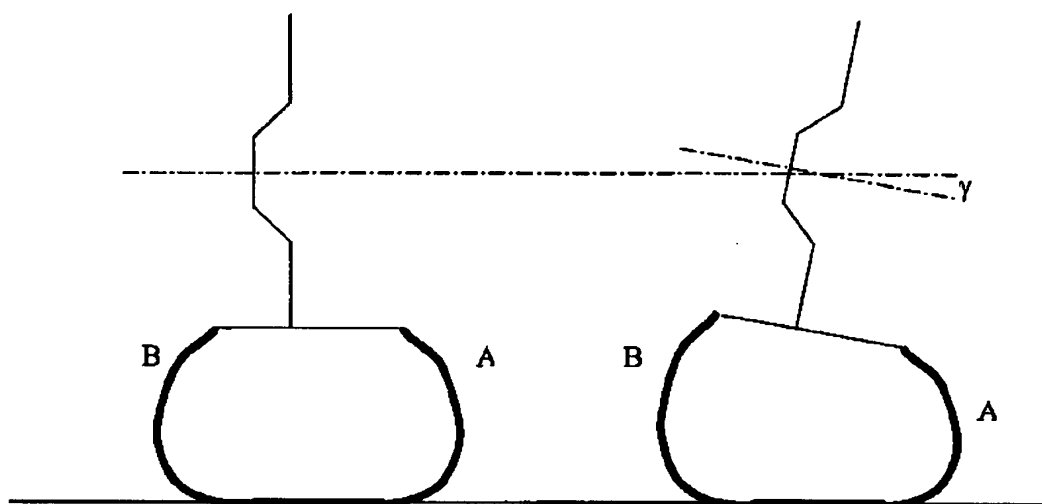


Figure 13

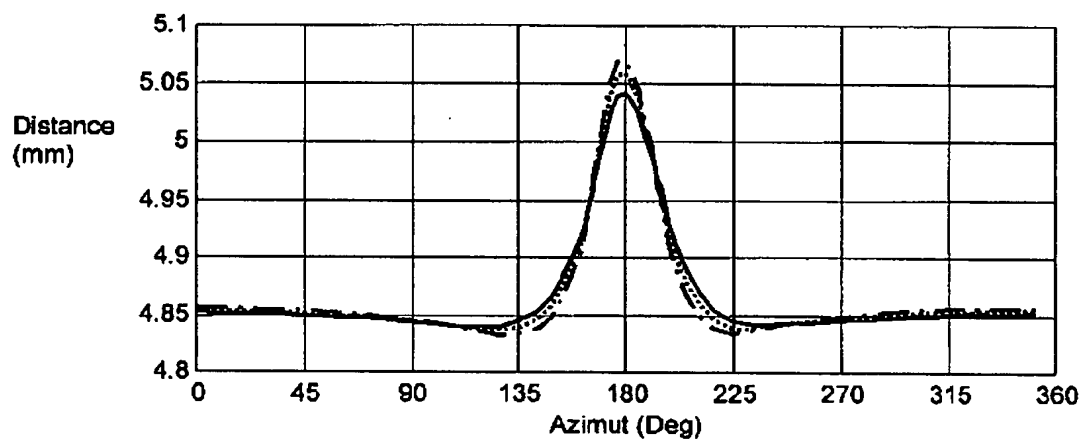
Distance entre les points A_1 et A_2 

Figure 14a

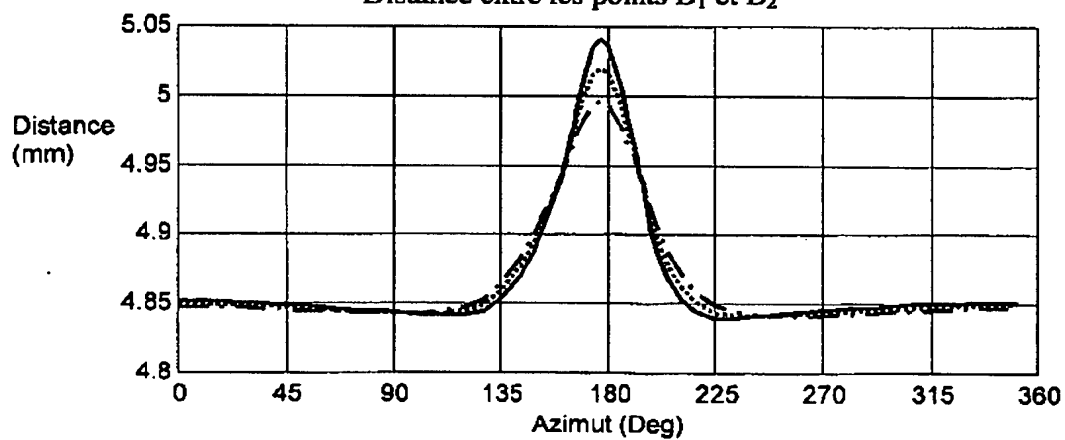
Distance entre les points B_1 et B_2 

Figure 14b

Figu

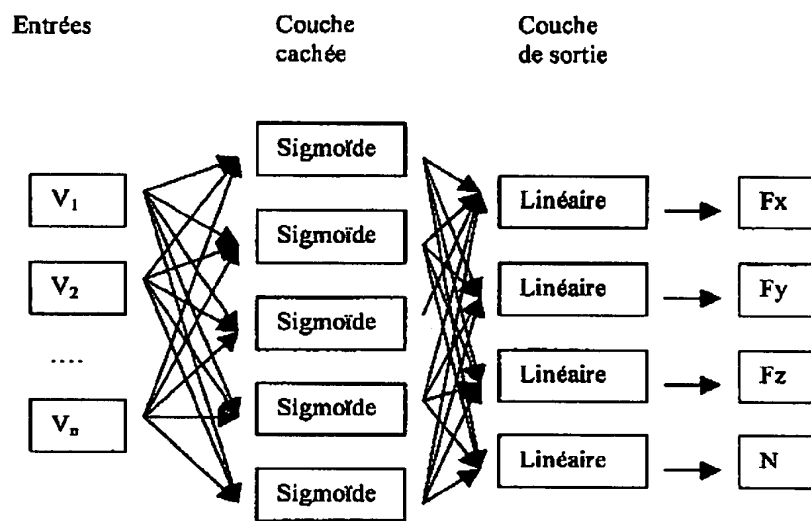


Figure 15

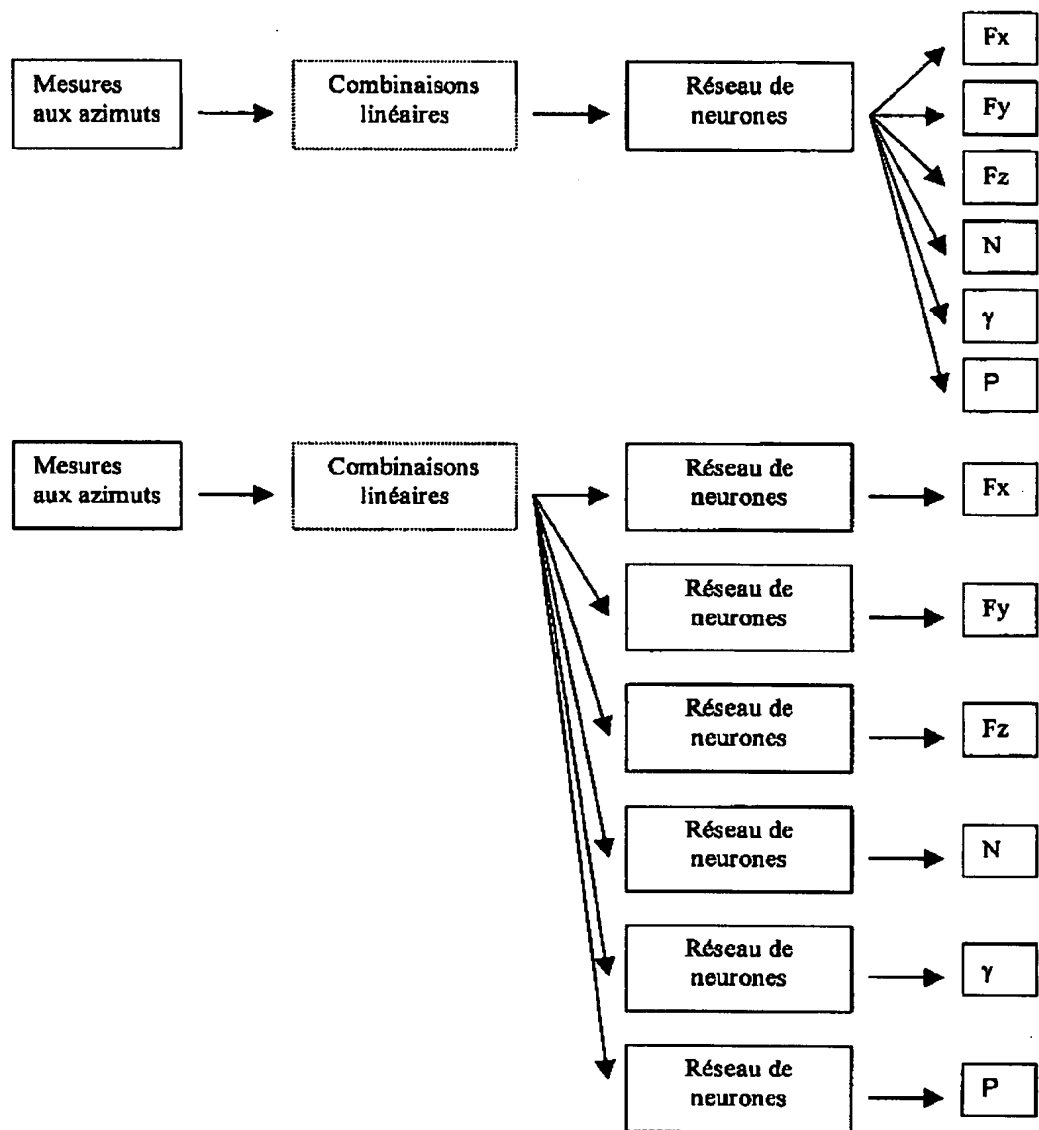


Figure 16

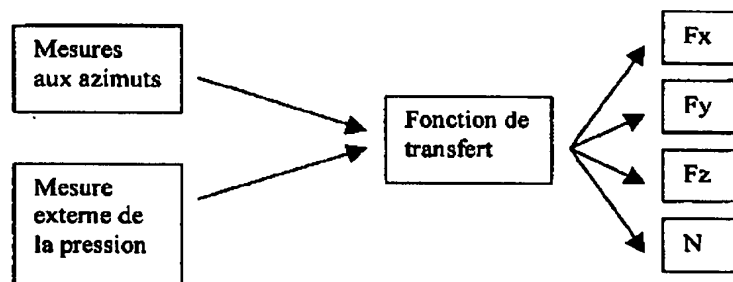


Figure 17a

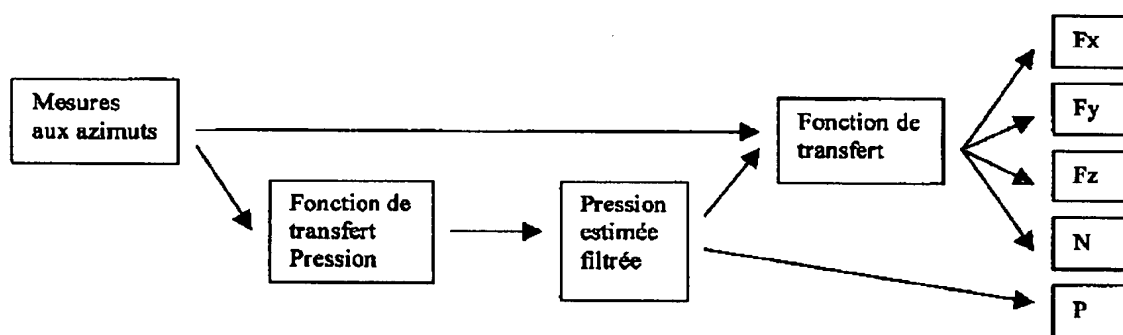


Figure 17b

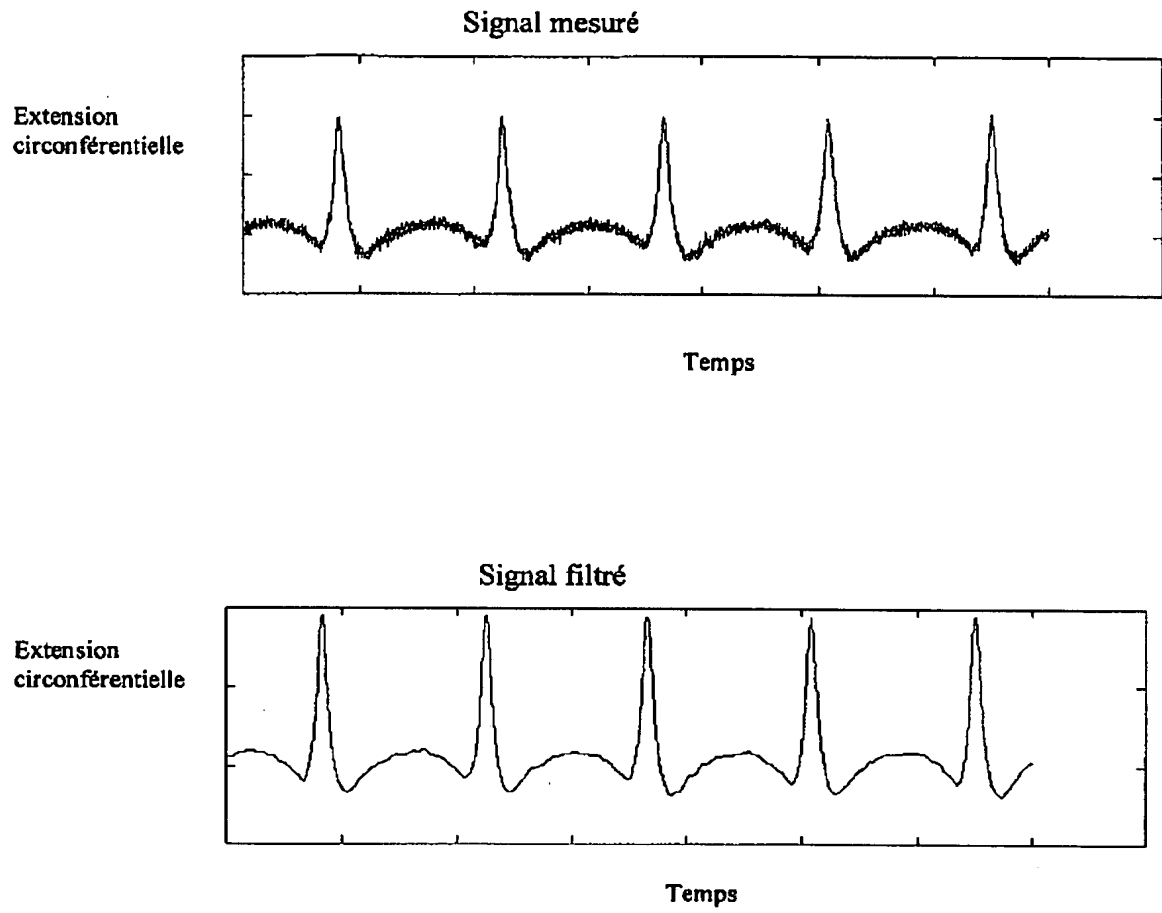


Figure 18

Principe du seuillage

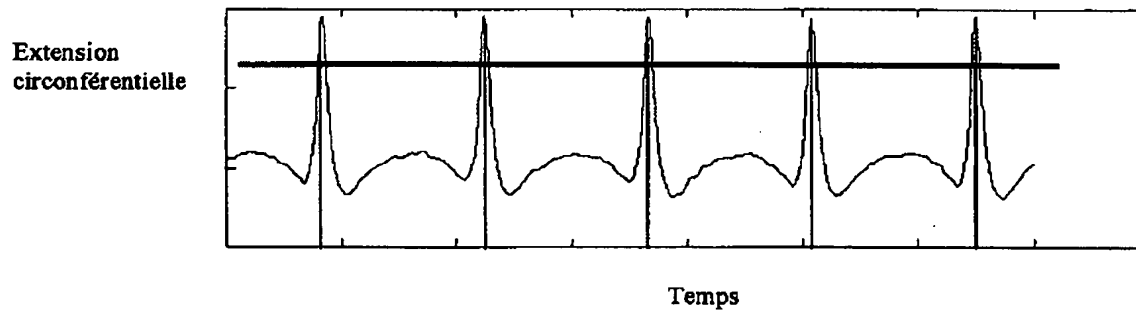


Figure 19

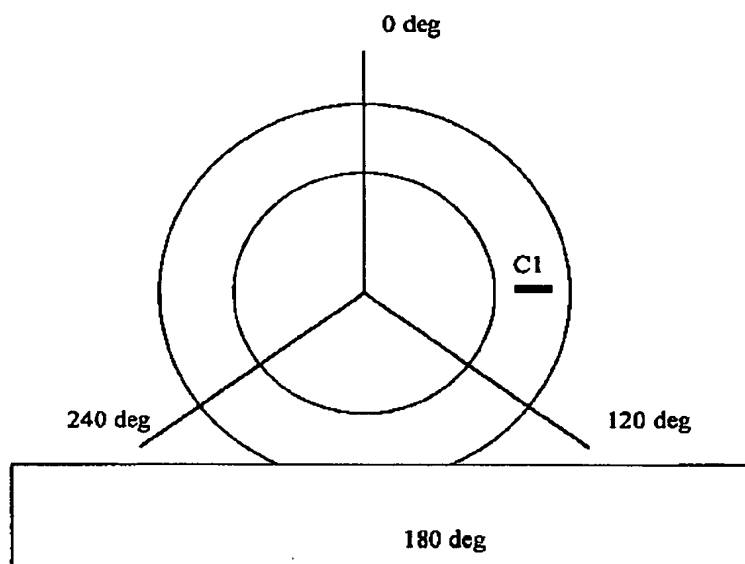


Figure 20

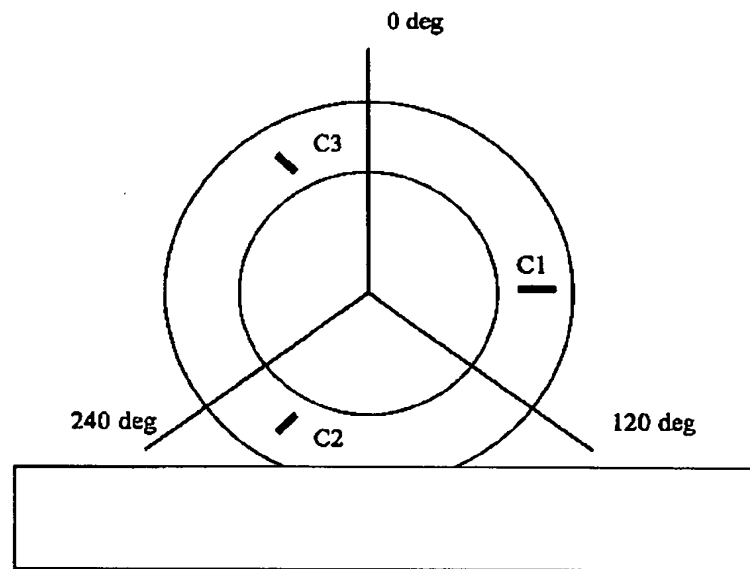


Figure 21

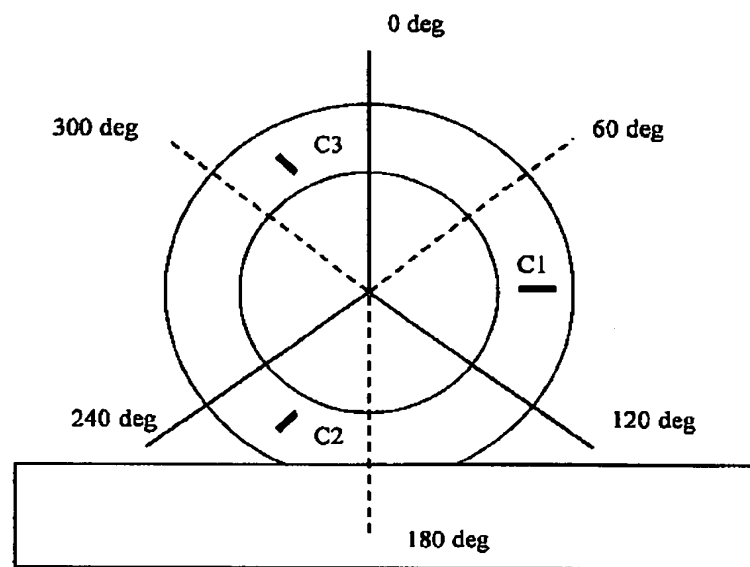


Figure 22

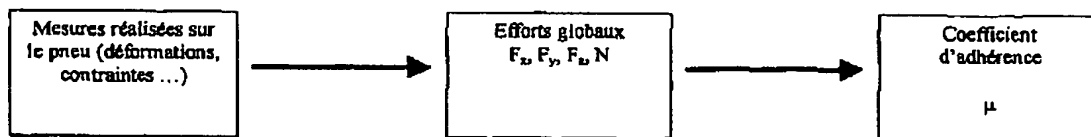


Figure 23

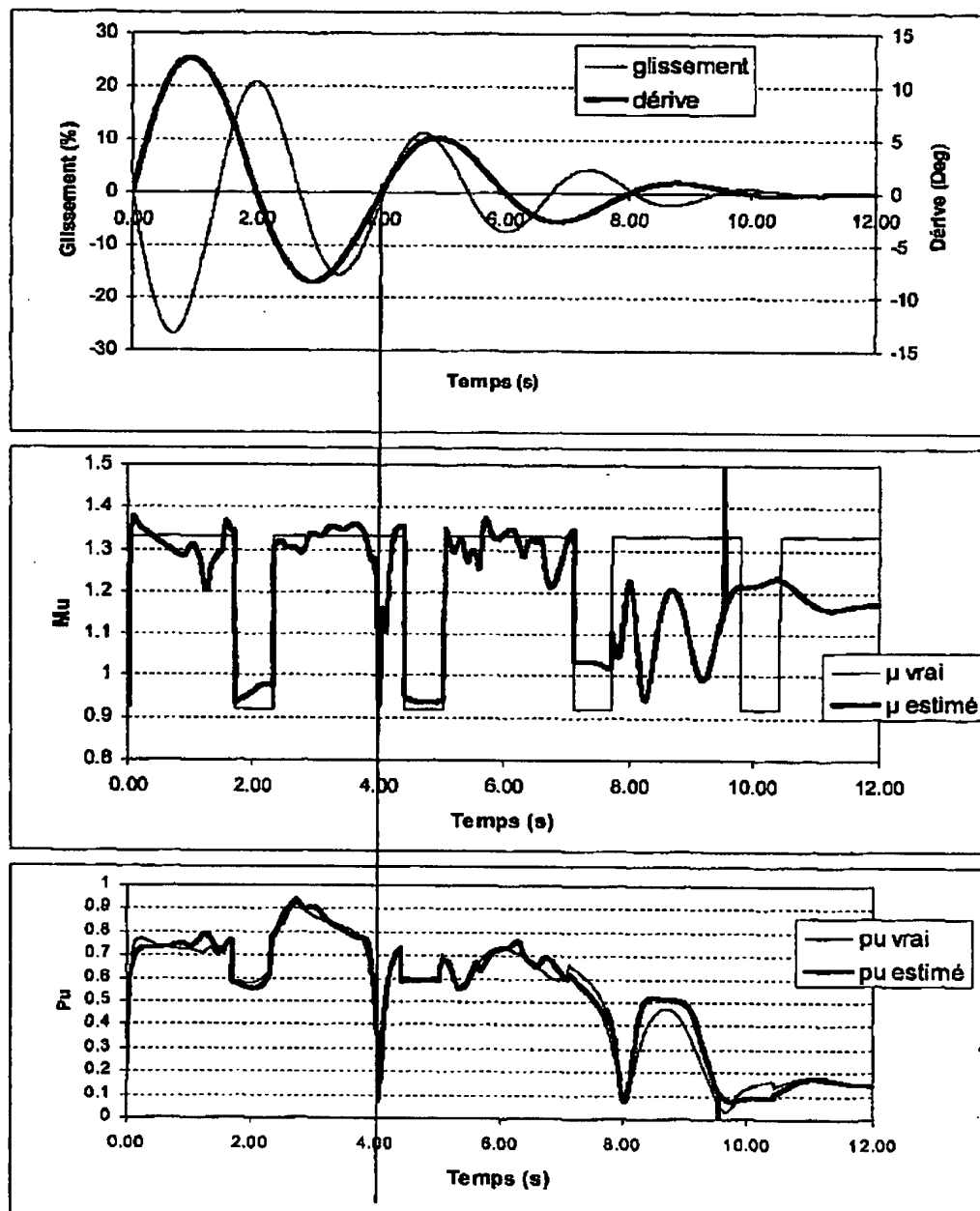


Figure 24

Internat	Application No
PCT/EP	03/01176

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 01 92078 A (CONTINENTAL AG ;GIUSTINO JAMES M (US)) 6 December 2001 (2001-12-06) abstract page 18, line 20 - line 23 figures 3,4 ---	1,4,6,8, 10
A	EP 0 937 615 A (SIEMENS AG) 25 August 1999 (1999-08-25) column 16, line 15 -column 17, line 21 figures 12,16,17 ---	1
A	US 2002/011093 A1 (MATSUNO KOJI) 31 January 2002 (2002-01-31) abstract figure 7 ---	1
	--- -/--	

X Further documents are listed in the continuation of box C.

X Patent family members are listed in annex.

^a Special categories of cited documents :

A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

E earlier document but published on or after the international filing date

L document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

*O' document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

P document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

*T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention.

'X' document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

'&' document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

4 June 2003

Date of mailing of the international search report

17/06/2003

Name and mailing address of the ISA
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040. Tx. 31 651 epo nl.
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer _____

Colonna, M

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Internet Application No
PCT/EP 03/01176

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 964 265 A (BECHERER THOMAS) 12 October 1999 (1999-10-12) * Le document en entier *	1
A	DE 39 39 917 A (BOSCH GMBH ROBERT) 6 June 1991 (1991-06-06) * Le document en entier *	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International application No
 PCT/EP 03/01176

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 0192078	A	06-12-2001	US 6550320 B1 AU 6524701 A GB 2379274 A WO 0192078 A2	22-04-2003 11-12-2001 05-03-2003 06-12-2001
EP 0937615	A	25-08-1999	DE 19807004 A1 EP 0937615 A2	09-09-1999 25-08-1999
US 2002011093	A1	31-01-2002	JP 2002012160 A DE 10130879 A1	15-01-2002 04-04-2002
US 5964265	A	12-10-1999	DE 19646235 C1 EP 0841550 A2	02-04-1998 13-05-1998
DE 3939917	A	06-06-1991	DE 3939917 A1 WO 9108129 A1 DE 59002663 D1 EP 0456774 A1 JP 4503790 T KR 186829 B1	06-06-1991 13-06-1991 14-10-1993 21-11-1991 09-07-1992 01-05-1999

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande nationale No
PCT/EP 03/01176

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 7 B60T8/00

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 B60T

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 01 92078 A (CONTINENTAL AG ;GIUSTINO JAMES M (US)) 6 décembre 2001 (2001-12-06) abrégé page 18, ligne 20 - ligne 23 figures 3,4	1,4,6,8, 10
A	EP 0 937 615 A (SIEMENS AG) 25 août 1999 (1999-08-25) colonne 16, ligne 15 -colonne 17, ligne 21 figures 12,16,17	1
A	US 2002/011093 A1 (MATSUNO KOJI) 31 janvier 2002 (2002-01-31) abrégé figure 7	1
	--- -/--	



Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *S* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

4 juin 2003

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

17/06/2003

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Colonna, M

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No
PCT/Lr 03/01176

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 5 964 265 A (BECHERER THOMAS) 12 octobre 1999 (1999-10-12) * Le document en entier *	1
A	DE 39 39 917 A (BOSCH GMBH ROBERT) 6 juin 1991 (1991-06-06) * Le document en entier *	1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demand nationale No
PCT/EP 03/01176

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 0192078	A	06-12-2001	US 6550320 B1 AU 6524701 A GB 2379274 A WO 0192078 A2	22-04-2003 11-12-2001 05-03-2003 06-12-2001
EP 0937615	A	25-08-1999	DE 19807004 A1 EP 0937615 A2	09-09-1999 25-08-1999
US 2002011093	A1	31-01-2002	JP 2002012160 A DE 10130879 A1	15-01-2002 04-04-2002
US 5964265	A	12-10-1999	DE 19646235 C1 EP 0841550 A2	02-04-1998 13-05-1998
DE 3939917	A	06-06-1991	DE 3939917 A1 WO 9108129 A1 DE 59002663 D1 EP 0456774 A1 JP 4503790 T KR 186829 B1	06-06-1991 13-06-1991 14-10-1993 21-11-1991 09-07-1992 01-05-1999